



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ PŘI
PŘÍMÉ VÝROBĚ SLÉVÁRENSKÝCH FOREM**

POSSIBILITIES OF USING ADITIVE TECHNOLOGIES IN DIRECT MANUFACTURING OF FOUNDRY
MOULDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Herzán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jiří Herzán**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti uplatnění aditivních technologií při přímé výrobě slévarenských forem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rešerše problematiky přímého zhotovení slévarenských forem a jader za pomoci nových moderních metod RP.

Cíle bakalářské práce:

Získání literárního přehledu nejmodernějších způsobů rychlého přímého zhotovení slévarenských forem metodami aditivních technologií.

Seznam literatury:

Encyklopedie 3D tisku. Aditivní výroba & Rapid Prototyping [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>

Rapid Prototyping: An Overview [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm

International Journal of Research in Engineering and Technology: SAND CASTING: CONVENTIONAL AND RAPID PROTOTYPING MANUFACTURING APPROACHES. 2014, 2014(03). ISSN 2319-1163

3D printing. Advanced equipment manufacturing [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.pfiaem.com/additive-manufacturing/3d-printing/>

Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. Konstrukter [online]. 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>

VAŠEK, V. Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s.

ČAGÁNEK, R. Možnosti uplatnění moderních aditivních technologií při výrobě prototypových odlitků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 41 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

HERZÁN Jiří: Možnosti uplatnění aditivních technologií při přímé výrobě slévárenských forem.

Bakalářská práce pojednává o výrobě slévárenských forem za využití aditivních technologií. Nejprve jsou v práci uvedeny aditivní technologie, které jsou rozděleny podle organizace ASTM (American Society for Testing and Materials). Dále je uvedeno dělení aditivních technologií dle skupenství základního materiálu. Následně jsou popsány tři druhy technologií, kterými je možné zhotovit odlitek metodou rychlého prototypování. Poslední kapitolou bakalářské práce je příklad reálné výroby prototypového odlitku ventilátoru ze slitiny hliníku AlSi9Cu3(Fe), který byl odlit do vytištěné slévárenské formy aditivní technologií „3D Sand Printing“ (3D tiskem písku). Na základě získaných dat byly zhodnoceny technické, časové a nákladové parametry výroby ventilátoru. Získané poznatky byly porovnány s technologií formování na tzv. volný model, která je alternativou výroby prototypu. Odlitek ventilátoru byl odlit ve firmě Armatmetal s.r.o. v Olomouci.

Klíčová slova: aditivní technologie, vypařitelný model, ztracená pěna, 3D tisk písku, přesné lití, ztracený vosk, ventilátor

ABSTRACT

HERZÁN Jiří: Possibilities of using additive technologies in direct manufacturing of foundry moulds.

The bachelor thesis deals with the production of foundry molds with using additive technologies. At first, the additive technologies are distributed according to ASTM (American Society for Testing and Materials) and subsequently according to the state of the base material. Then, three types of technologies, that can be manufactured by Rapid Prototyping are described. The last chapter of the bachelor thesis is a real example of the production of a prototype fan casting from aluminum alloy AlSi9Cu3(Fe), which was casted into a printed mold by “3D Sand Printing” technology. Based on the obtained data were assessed technical, time and cost parameters of manufacturing the fan. The findings were compared with the molding technology of the ordinary printed pattern, which is an alternative to prototype production. The casting of the fan was cast in Armatmetal s.r.o. in Olomouc.

Keywords: additive technology, full mold, lost foam, 3d sand printing, investment casting, lost-wax casting, cooling fan

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HERZÁN, Jiří. *Možnosti uplatnění aditivních technologií při přímé výrobě slévárenských forem*. Brno, 2017. 43s, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor Slévárenství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 27.5.2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu prof. Ing. Milan Horáček, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za plnou podporu a pomoc a také firmám Armatmetal s.r.o. a Focam s.r.o. za poskytnutí informací a spolupráci.

OBSAH

| | |
|-----------------------|--|
| Zadání | |
| Abstrakt | |
| Bibliografická citace | |
| Čestné prohlášení | |
| Poděkování | |
| Obsah | |

| | Str. |
|--|------|
| ÚVOD | 9 |
| 1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE | 10 |
| 1.1 Princip aditivních technologií | 10 |
| 1.2 Vývoj aditivních technologií | 11 |
| 1.3 Klasifikace aditivních technologií | 12 |
| 1.3.1 Metody založené na tekutém základě | 14 |
| 1.3.2 Metody založené na pevném základě | 15 |
| 1.3.3 Metody založené na práškovém základě | 16 |
| 2 VÝROBA FOREM KE ZHOTOVENÍ PROTYPOVÝCH ODLITKŮ | 17 |
| 2.1 Výroba forem metodou vypařitelného modelu „Full Mold“ | 17 |
| 2.1.1 Výroba polystyrenového bloku a modelu | 18 |
| 2.1.2 Technologická příprava modelu a lití | 19 |
| 2.1.3 Vypařitelný model pro sériovou výrobu „Lost Foam“ | 20 |
| 2.1.4 Porovnání | 21 |
| 2.2 Přímá výroba forem 3D tiskem písku „3D Sand Printing“ | 21 |
| 2.2.1 Princip technologie | 21 |
| 2.2.2 Společnosti zabývající se technologií „3D Sand Printing“ | 23 |
| 2.2.3 Seznam zařízení pro přímý tisk pískových forem a jader | 24 |
| 2.2.4 Příspěvky potřebné k vytištění slévarenské směsi | 24 |
| 2.2.5 Zařízení ExOne S-Max® | 26 |
| 2.3 Technologie vytavitelného modelu za využití aditivních technologií | 28 |
| 2.3.1 Princip zhotovování odlitků technologií vytavitelného modelu | 29 |
| 2.3.2 Využití aditivních technologií u technologie přesného lití | 31 |
| 2.3.3 Aditivní technologie u lití do skořepinových forem | 32 |
| 3 PŘÍKLAD VÝROBY ODLITKU LITÉHO DO TIŠTĚNÉ FORMY | 34 |
| 3.1 Odlitek ventilátoru | 34 |
| 3.2 Realizace odlitku ventilátoru | 35 |
| 3.3 Příprava vytištěné formy | 35 |
| 3.4 Zhodnocení odlitku ventilátoru | 38 |
| 4 ZÁVĚRY | 43 |
| Seznam použitých zdrojů | |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | |
| Seznam obrázků | |
| Seznam tabulek | |
| Seznam příloh | |

ÚVOD [1], [2], [3]

Aditivní technologie (dále AT) jsou definovány jako spojování materiálu k vytvoření objektu ze 3D dat vrstvou po vrstvě. V literaturách je pojem AT také znám jako 3D tisk. 3D tisk se nejvíce využívá v automobilovém a leteckém průmyslu, lékařství, architektuře ale také při výrobě šperků. AT se uplatňují i v kontroverznějších odvětvích jako například v potravinářském průmyslu nebo při výrobě hudebních nástrojů, šatů a různých módních doplňků, stolovacích náčiní, ale také nacházejí využití v umění a filmovém průmyslu.

Národní úřad pro letectví a kosmonautiku NASA například plánuje využívat 3D tiskárny k tištění pokrmů přímo ve vesmíru.

Ve filmu Skyfall od režiséra Sama Mendese bylo využito AT k vytvoření repliky auta Aston Martin DB5 (Obr. 1 a Obr. 2), který ve filmu řídil James Bond. Replika skládající se z 18 vytištěných částí byla ve filmu zničena a pravý Aston Martin DB5 zůstal nepoškozen. Auto bylo vytištěno tiskárnou od německé společnosti Voxeljet, kterou využívá firma zabývající se výrobou filmových rekvizit (Propshop Modelmakers).

Firma Nike je vlastníkem patentu týkajícího se 3D tisku bot. Podle společnosti Nike bude v budoucnu možné okamžitě vytisknout zákazníkovi obuv na míru přímo v prodejně. Ukázka vytištěné obuvi je zobrazena na Obr. 3.

Hlavní výhodou AT ve všech odvětvích průmyslu je výrazné snižování doby k vytvoření nových výrobků a možnost jejich testování před uvedením výrobků na trh.



Obr. 1 Plastový Aston Martin DB5 [4]



Obr. 2 Model Aston Martin DB5 [5]



Obr. 3 Vytištěná sportovní obuv [6]

1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Pod názvem AT je zahrnuto několik metod, které vytvářejí výrobek vrstvením neboli aditivním postupem. Základní princip je u většiny metod podobný.

1.1 Princip aditivních technologií [1], [7], [8]

Nejdříve je nutné zhotovit model pomocí systému CAD-CAM (Computer-Aided Design – Computer-Aided Manufacturing). Model ze 3D dat je následně převeden to formátu, který dokáže tiskové zařízení přečíst a poté zhotovit výrobek. Nejvíce využívaným formátem je formát STL, který byl vytvořen společností 3DSystems. 3DSystems jako první firma představila zařízení, které bylo schopné vytvořit hmatatelný objekt z digitálních dat.

STL formát aproximuje plochy modelu na jednoduché polygony (trojúhelníky). Čím více je model složitější, tím více trojúhelníků je na modelu zobrazeno a tím více je soubor větší. Do tohoto formátu je schopno převést model většina CAD softwarů. Data se do zařízení přenášejí elektronicky (flash disk, email, LAN-Local Area Network).

Před přenesením dat je nutné data připravit k tisku. Pomocí různých softwarů se aproximovaný CAD soubor rozdělí na jednotlivé hladiny o tloušťce 0,02-0,7 mm, přičemž platí, že čím menší je tloušťka vrstvy, tím kvalitnější je povrch, ale zároveň čas tisku je se snižující se tloušťkou delší. Tloušťka hladiny závisí na typech AT. Například u technologie STL je rozsah vrstvy 0,12-0,5 mm. Poté je nutné určit polohu součástí, orientaci součástí a stavbu podpor. Podpory jsou vhodné například při zpevňování tenkých stěn. Neméně důležitým krokem při přípravě modelu je kontrola vzniku vnitřních vad 3D modelu, které byly převedeny do formátu STL. Chyby se projevují například vytvořením nežádoucích mezer, prasklin nebo překrytím trojúhelníků, které by za ideálních okolností měly na sebe plynule navazovat. Tyto chyby vznikají použitím méně pokročilých modelovacích softwarů. Za pokročilejší software lze považovat Pro/ENGINEER, Catia nebo Solidworks. Tyto programy jsou schopny vytvářet pevná tělesa a těleso modelovat přesněji. Méně pokročilejší software je například AutoCad.

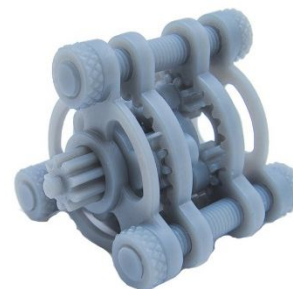
Po převedení CAD dat do STL formátu, rozdělení virtuálního modelu na vrstvy a překontrolování chyb následuje stavba reálné součásti. Způsobů, kterými lze výsledný výrobek zhotovit je několik. Po vytištění modelu je nutné provádět dokončovací operace ke zlepšení celkové celistvosti. Zhotovený výrobek je dokončován manuálně, a to značí možné riziko poškození modelu. Při dokončovacích operacích je proto potřeba dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo ke zmaření předchozí práce.



Obr. 4 CAD model hřídele vytvořený v softwaru AutoDesk Inventor



Obr. 5 Převedená hřídel do STL formátu v softwaru AutoDesk Inventor



Obr. 6 Vytištěné soukolí [9]

1.2 Vývoj aditivních technologií [1], [8], [10], [11]

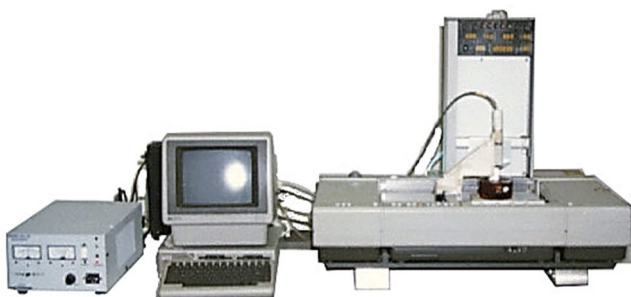
V roce 1983 byl vyvinut první systém, který byl schopen vytvořit výrobek z digitálních dat. O vývoj této technologie se zasloužil Chuck Hull, který první 3D tiskové zařízení uvedl na trh v roce 1987. Zařízení dostalo název SLA-1(Stereolitografie-1). Stereolitografii Chuck Hull popsal jako způsob a zařízení, které je schopno vytvořit pevný předmět vytvrzováním fotocitlivé tekutiny působením UV záření na tenkou vrstvu této kapaliny. Chuck Hull a jím založená společnost 3D Systems postupem času objevil, že lze vrstveným způsobem zhotovovat objekty i jinak, než vytvrzováním kapaliny. Vynalézáním jiných metod tak vytvořil pojem, který je znám jako AT. Kromě SLA (Stereolitografie) se začaly objevovat další metody. Například FDM (Fused Deposition Modelling) a LOM (Laminated Object Manufacturing) v roce 1991 a SLS (Selective Laser Sintering) v roce 1992.

Nové aplikace aditivních systémů postupně nacházely uplatnění a docházelo k jejich rozvoji. Nejvíce se rozvíjely druhy používaných základních materiálů a pryskyřic. Novější technologie začaly být přesnější, rychlejší a umožňovaly realizovat čím dál náročnější požadavky zákazníků.

V roce 1993 byla společností Soligen Technologies, Inc. představena technologie DSPC (Direct Shell Production Casting), založená na tisku keramických prášků. Ve stejném roce společnost 3D Systems přišla s novinkou QuickCast umožňující tisk speciálně upravených polymerů. V roce 1994 firma Kira Corporation představila systém PLT (Paper Lamination Technology) fungující na principu lepení vrstev papíru na sebe za působení tlaku a tepla. V roce 1998 firma Optomec prodala první zařízení umožňující přímý tisk kovů z kovových prášků (LENS – Laser Engineered Net Shaping). Roku 1999 společnost Fockele a Schwarze z Německa představila technologii SLM (Selective Laser-Melting). Jedná se o přímé spékání kovových prášku laserem v inertním prostředí.

Čím více a lépe byly AT schopny vytvářet kovové součásti, tím více se začalo uvažovat o přímém využití vytištěných součástek do automobilového a leteckého průmyslu. Prvky byly tisknuty nejprve z důvodu zkoušení nových tvarů a k jejich ověření z hlediska funkčnosti. Nakonec některé součásti vykazovaly dostatečné vlastnosti pro jejich přímé využití bez velkých úprav.

Od roku 2002 lze dokonce zpracovávat širokou škálu materiálů, kterou je schopné přijmout lidské tělo. Tiskárny jsou schopny tisknout tento materiál spolu s živými buňkami. Příslibem této technologie je tisk lidských orgánů a jejich přímá transplantace. O tento vývoj se zaslouhuje vědecký institut na Univerzitě ve Freiburgu a společnost EnvisionTEC.



Obr. 7 První 3D tiskárna vynalezená Chuckem Hullem v roce 1983 [12]



Obr. 8 První vytištěná součást Chuckem Hullem v roce 1983 [13]

1.3 Klasifikace aditivních technologií [8], [14], [15], [16]

AT jsou klasifikovány výborem ASTM (Americká Společnost pro Zkoušení a Materiály – American Society for Testing and Materials). Výbor zabývající se AT má okolo čtyř set členů a je tvořen hlavním výborem ASTM Committee F42 a několika podvýbory. Hlavní výbor ASTM Committee F42 byl založen v roce 2009 a od té doby se zúčastňuje technických zasedání dvakrát do roka a má kolem sta členů.

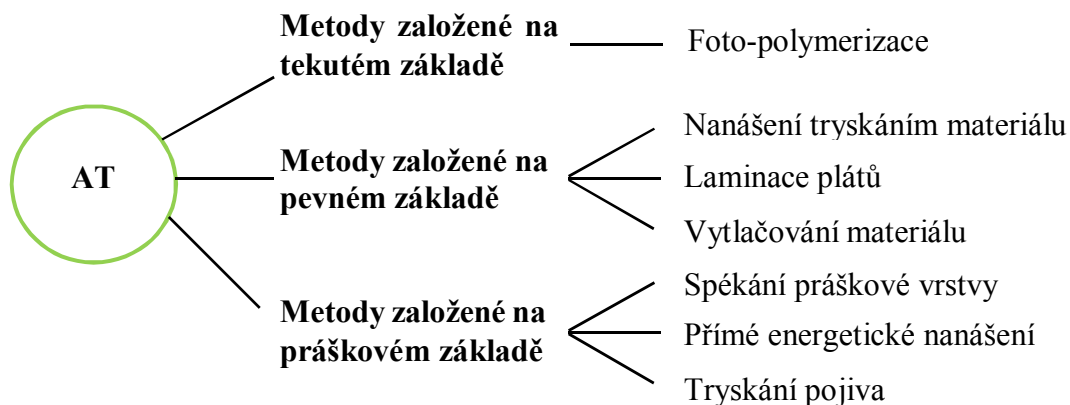
ASTM F42 se zaměřuje na podporu znalostí a na rozvoj norem nových a úpravu stávajících AT. AT byly touto institucí rozděleny na sedm částí podle typu používaného materiálu, způsobu nanášecí techniky a způsobu, jakým je materiál taven nebo jakým způsobem materiál tuhne. ASTM F42 klasifikoval AT dle Tab. 1.

Tab. 1 Rozdělení aditivních technologií dle ASTM F42 [14], [17]

| Proces | Popis | Technologie |
|-------------------------------------|---|---|
| FOTOPOLYMERIZACE | Foto-citlivá pryskyřice je selektivně vytvrzována působením světla. | <ul style="list-style-type: none"> ▪SLA (Stereolitografie) ▪DLP (Digital Light Processing) ▪CDLP (Continious Digital Light Processing) ▪3SP (Scan, Spin, and Selectively Photocure) |
| <i>Materiál</i> | <i>plast</i> | |
| NANÁŠENÍ TRYSKÁNÍM MATERIÁLU | Kapičky materiálu jsou tryskány na sebe vrstvou po vrstvě. Nejběžnější technologií je tryskání foto-vytvrditelné pryskyřice a tryskání roztavených materiálů, které následně tuhnou při pokojové teplotě. | <ul style="list-style-type: none"> ▪MJP (MultiJet Printing) ▪DOD (Drop On Demand) ▪NPJ (NanoParticle Jetting) |
| <i>Materiál:</i> | <i>plast, vosk, kov</i> | |
| TRYSKÁNÍ POJIVA | Kapalná pojiva jsou selektivně aplikována na tenké vrstvy práškového materiálu, jejichž kontaktem dochází k vytvrzení. K vytvrzení je obvykle třeba tepelné zpracování. | <ul style="list-style-type: none"> ▪BJ (Binder Jetting) |
| <i>Materiál:</i> | <i>sádra, ostřívo, kov</i> | |
| VYTLAČOVÁNÍ MATERIÁLU | Materiál je vytlačován tryskou nebo distribučním otvorem. Metoda funguje na podobném principu jako tavná pistole. | <ul style="list-style-type: none"> ▪FDM (Fused Deposition Modeling) ▪FFF (Fused Filament Fabrication) |
| <i>Materiál</i> | <i>kompozit, plast</i> | |

| | | |
|---|---|---|
| SPÉKÁNÍ PRÁŠKOVÉ VRSTVY | Práškové materiály jsou selektivně spékány pomocí laseru nebo elektronového paprsku. | <ul style="list-style-type: none"> ▪MJF (Multi-Jet Fusion) ▪SLS (Selective Laser Sintering) ▪DMLS/SLM (Direct Metal Laser Sintering/Selective Laser Sintering) ▪EBM (Electron Beam Melting) |
| <i>Materiál:</i> | <i>plast, kov</i> | |
| LAMINACE PLÁTŮ | Pláty materiálu jsou naskládány a laminovány na sebe působením tepla a tlaku. Pláty jsou spojovány lepením, svařováním nebo pájením. | <ul style="list-style-type: none"> ▪SDL (Selective Deposition Lamination) ▪LOM (Laminated Object Manufacturing) ▪UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing) |
| <i>Materiál:</i> | <i>kompozit, papír</i> | |
| PŘÍMÉ ENERGETICKÉ NANÁŠENÍ | Práškový materiál nebo materiál ve formě drátu je přinesen do tavné lázně, kde je spečen laserovým, elektronovým nebo plazmovým paprskem. | <ul style="list-style-type: none"> ▪LMD (Laser Metal Deposition) ▪EBF3 (Electron Beam Free-Form Fabrication) ▪DMD (Direct Metal Deposition) ▪LENS (Laser Engineered Net Shaping) |
| <i>Materiál:</i> | <i>kov</i> | |

Nejvyužívanějšími AT je fotopolymerizace, tryskání materiálu, spékání práškové vrstvy a vytlačování materiálu. Technologie jsou založeny na tekutém, pevném nebo práškovém základě. Rozdělení je zobrazeno na Obr. 9.











Obr. 9 Rozdělení AT dle skupenství základního materiálu [8], [14]

1.3.1 Metody založené na tekutém základě [1], [18]

AT založené na tekutém základě využívají vlastností foto-vytvrditelné pryskyřice. Jedná se o organickou pryskyřici, která je vytvrzována působením světla. Často jsou pryskyřice vytvrzovány působením laseru, jejichž vlnová délka se pohybuje v oblasti UV záření. Působením tohoto záření je vytvrzována tenká vrstva původně tekuté pryskyřice. Jakmile je tato vrstva vytvrzena, platforma je snížena o tloušťku další vrstvy. Spuštěním platformy dojde k obalení právě vytvrzeného povrchu tekutou pryskyřicí a následuje vytvrzování další vrstvy. Proces se opakuje, dokud nedojde k vytvrzení předem nadefinovaných vrstev a k dokončení konečného tvaru. Poté následuje vyjmutí výrobku ze soudku, ve kterém je umístěna platforma i tekutina. Výrobek je následně vysušen a dále opracováván. Metody od jiných výrobců se mohou lišit zejména druhem záření, typem pryskyřice, technikou nanášení či velikostí boxu a průměrnou tloušťkou nanášené vrstvy. Nejčastěji se vyskytující druhy technologií jsou uvedeny v Tab. 2.





Tab. 2 Technologie založené na tekutém základě [8], [20], [21], [22], [23], [24], [25]

| Název technologie | Princip | Dodavatelé |
|--|---|--|
| SLA-STEREOLITHO-GRAPHY | Stavební platforma je umístěna v boxu spolu s tekutou fotopolymerní pryskyřicí. Přičemž na začátku je ponořena pouze o tloušťku první vrstvy. Poté je tekutá foto-vytvrditelná pryskyřice vytvrzována působením laserového paprsku, jehož vlnová délka se nachází v oblasti ultrafialového záření. Po dokončení prvního kroku se platforma znovu sníží o tloušťku další vrstvy. Proces je opakován do zhotovení součástí. | <div>3D Systems </div> <div>Formlabs </div> <div>DWS </div> |
| DLP – DIGITAL LIGHT PROCESSING | Podobný princip jako u SLA. Místo laserového záření je využíváno digitálního záření. | <div>EnvisionTec </div> <div>B9 Creatorions </div> |
| BIOPLOTTER | Na platformu, která je umístěna v boxu s kapalinu probíhá nanášení materiálu, který obsahuje mimo jiné i živé buňky. Nanášení probíhá skrze tenkou jehlu o $\varnothing 80 \mu\text{m}$. | EnvisionTec  |
| SOUP – SOLID OBJECT ULTRAVIOLET-LASER PRINTER | Podobný princip jako SLA. Laserový paprsek je usměrňován galvanometrovým zrcadlem, které reguluje průtok laseru. | CMET  |
| POLYJET | Podpůrný a stavební materiál je umístěn v tiskové hlavě a je postupně vrstven na platformu. Vytvrzování probíhá za pomoci UV laseru. | Stratasys  |

1.3.2 Metody založené na pevném základě [1], [7], [18]

AT založené na pevném základě nedisponují žádnou tekutinou jako ji využívali AT založené na tekutém základě. Avšak vytvrzování probíhá pomocí laseru jako u předchozí metody. Zatímco u metod založených na tekutém základu laser slouží zejména k vytvrzování foto-vytvrditelné pryskyřice. U metod založených na pevném základě je laser využíván spíše k vyřezávání požadovaných obrysů. Technologie využívající základní materiál v pevném stavu se liší ve formě tohoto materiálu. Některé z nich využívají základní materiál ve formě drátů nebo vláken, která jsou roztavena a selektivně nanášena na platformu. Další materiály se například vyskytují ve formách listů papíru, které jsou následně lisovány a spékány tepelně vyhřívanými válci.






Tab. 3 Technologie založené na pevném základě. [1], [8], [24], [25], [26], [27]

| Název technologie | Princip | Dodavatelé |
|--|--|--|
| FDM – FUSED DEPOSITION MODELING | Materiál ve tvaru vláken je podavačem přesunut do tiskové hlavy, která je vyhřívaná a taví přivedené vlákno. Takto natavený materiál je selektivně nanášen na platformu, kde okamžitě tuhne. | <i>Stratasys</i>  |
| LOM – LAMINATED OBJECT MANUFACTURING | Papír je umístěn na rolích, kterými je polohován na platformu, kde je laserem ořezán tvar výrobku a jeho okolí. Po ořezání je rolemi navinuta další vrstva papíru na platformu, kde je spečena laminovacím válcem k předchozí vrstvě. Následně se opět vyřeže tvar výrobku. Po dokončení procesu je třeba odstranit přebývajícím materiál. | <i>Cubic Technologies</i>  |
| SDL – SELECTIVE DEPOSITION LAMINATION | Podobný princip jako u LOM. Papír je ve formě listů, nikoliv ve formě papírových rolí. Řezání neprobíhá pomocí laseru, ale pomocí nože s wolframovou špičkou. | <i>Mcor Technologies</i>  |
| PLT – PAPER LAMINATION TECHNOLOGY | Podobný princip jako SDL. Na listy papíru je nanesen pryskyřicový prášek. Potom je papír s práškem přenesen na platformu, kde je spečen na předchozí vrstvu papíru. Tvar výrobku je ořezán pomocí nože. | <i>Kira Corporation</i>  |

1.3.3 Metody založené na práškovém základě [1], [7], [18]

AT založené na práškovém základě využívají základní materiál v sypkém stavu. Prášek je umístěn v boxu a vytvrzován vrstvou po vrstvě laserem, elektronovým paprskem nebo chemickou reakcí za použití pryskyřic, tmelu nebo lepidel. Práškový materiál může být z nylonu, elastomeru, polystyrenu, oceli nebo slévárenských ošťiv.

Tab. 4 Technologie založené na práškovém základě [1], [18], [19], [28], [29], [30], [31]

| Název technologie | Princip | Dodavatelé |
|--|---|---|
| SLS – SELECTIVE LASER SINTERING | Podobný princip jako SLA, ale místo tekutého polymeru je v boxu umístěn sypký stavební materiál. Spékání probíhá působením CO ₂ laserem na částičky práškového materiálu. | 3D Systems  |
| LENS – LASER ENGINEERED NET SHAPING | Spékání prášku probíhá díky laseru působícího na velmi malou plošku. Prášek je přiváděn pomocí stlačeného plynu na platformu speciálními tryskami. Laser, optika i trysky jsou umístěny v uzavřené nanášecí hlavě, která se pohybuje pouze ve směru horizontálním. Vertikální posun výrobku umožňuje platforma. | Optomec  |
| EBM – ELEKTRON BEAM MELTING | Podobný princip jako SLS, ale spékání prášku je zajišťováno elektronovým paprskem. Stavba součásti probíhá ve vakuovém prostoru za teploty 1000°C. | Arcam  |
| BJ – BINDER JETTING | Roznášecím válcem je rozprostřen prášek na platformu. Po rozprostření vrstvy prášku je pomocí tiskové hlavy selektivně nanášeno pojivo, které reaguje s práškem a dochází tak k chemickému vytvrzování. Platforma je následně snížena o tloušťku vrstvy a vytvoří tak nový pracovní prostor pro tvorbu dalších vrstev. Předchozí kroky jsou opakovány do zhotovení výrobku. | VoxelJet ExOne   |

2 VÝROBA FOREM KE ZHOTOVENÍ PROTYPOVÝCH ODLITKŮ

Rychlé prototypování ve slévárenství má význam pro zhotovení odlitku, který musí být dodán v co nejkratším časovém úseku, který musí splňovat veškeré metalurgické a technologické požadavky a který musí být bez vad. Takto zhotovený odlitek je velice dobře finančně ohodnocený. Na druhou stranu, pokud odlitek nesplní výše uvedené požadavky, pak dochází k velkým finančním ztrátám slévárny a ztrátám důvěry zákazníka se slévárnou.

Důležitým faktorem, kromě zkušeností slévárenských technologů, metalurgů a formířů, je znalost metod a technologií, kterými může být daný odlitek zhotoven v dané slévárně tak, aby splnil nároky zákazníka a zároveň aby náklady na jeho výrobu byly nižší než předem dohodnutá cena za tento odlitek. Náklady na výrobu odlitku se skládají z několika aspektů: *náklady na výrobu forem a jader respektive modelů, náklady na zhotovení 3D podkladů na výrobu forem a jader respektive modelů, náklady na vsázku, náklady na energii, náklady na mzdy apod.* Volba vhodné metody a způsob odlévání se kromě nákladů na výrobu odvíjí také od druhu odlitku, jeho velikosti, hmotnosti, tvaru, požadovaného materiálu apod. Tato kapitola pojednává o třech technologiích zhotovování prototypových a tvarově složitých odlitků.

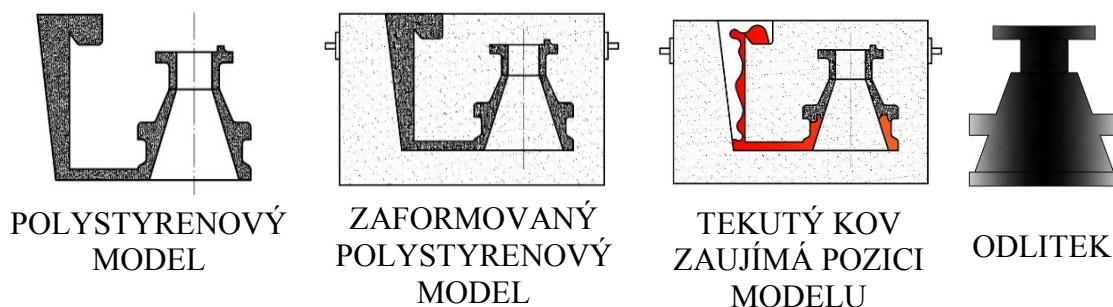


Obr. 10 Ukázka prototypového odlitku chladiče.

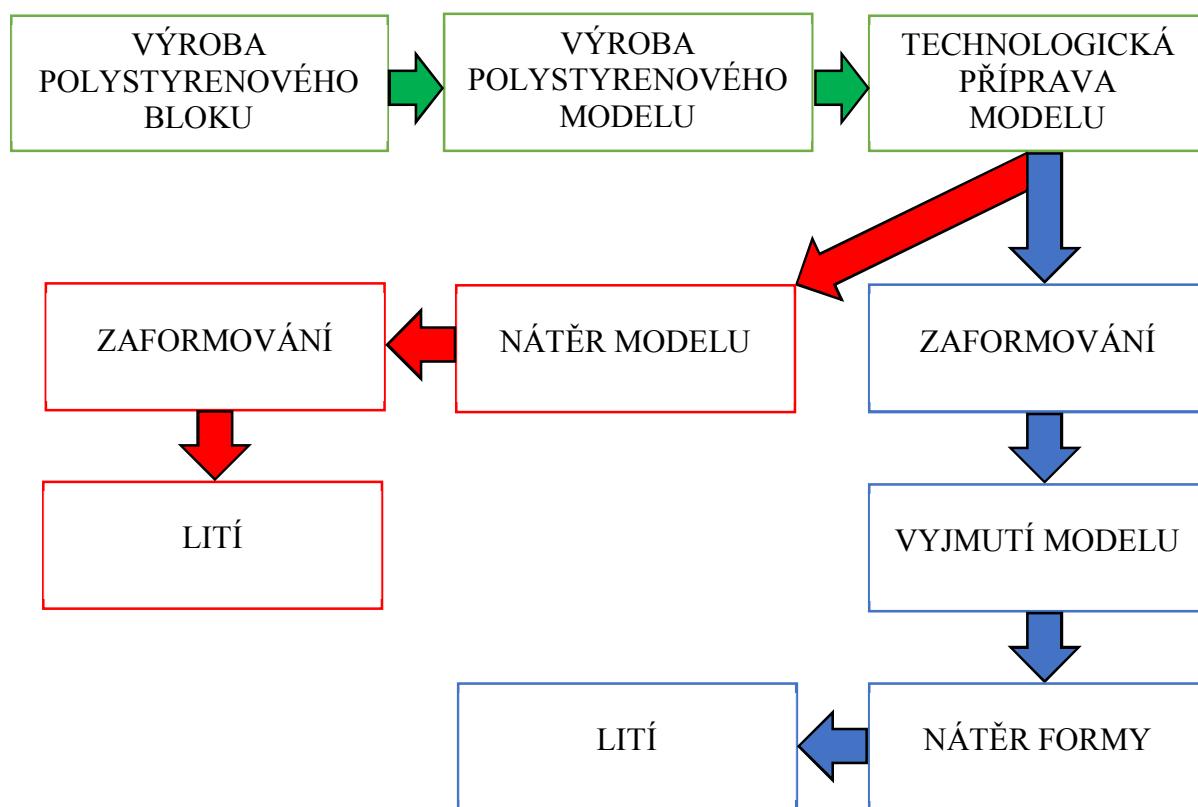
2.1 Výroba forem metodou vypařitelného modelu „Full Mold“ [32], [33], [34], [35]

Výroba odlitků na vypařitelný model je založená na původním patentu H.F. Shroyera. První zmínky o jeho pokusech byly uvedeny v odborném časopise Foundry v roce 1956. H.F. Shroyerův patent výroby odlitku na vypařitelný model spočívá v zaformování polystyrenového modelu do formovací směsi s pojivem a následného vypaření modelu v důsledku vysokých teplot při odlévání. V průběhu vypařování modelu tekutý kov zaujme jeho pozici. Patent této technologie získal H.F. Shroyer v roce 1958.

Výrobní cyklus odlitku zhotovovaného metodou vypařitelného modelu začíná výrobou polystyrenového bloku v předpěňovacím zařízení. Tento blok je následně obráběn do daného tvaru a dopraven do slévárny. Ve slévárnách technologové provedou technologickou přípravu modelu k lití. Následující postup vyhotovení odlitku může mít dvě cesty. Připravený model se může zaformovat, přičemž tekutý kov při lití vypaří model a zaujme jeho pozici. Druhou možností je zaformovaný model před litím odstranit, čímž se eliminuje možnost uzavření plynů vznikajících při lití v odlehklých dutinách formy. Schéma postupu je zobrazeno na Obr. 12.



Obr. 11 Postup výroby odlitku metodou vypařitelného modelu [34]



Obr. 12 Postup technologie vypařitelného modelu

2.1.1 Výroba polystyrenového bloku a modelu [36]

Základem pro výrobu polystyrenového bloku je zpěňovatelný polystyren ve formě perliček, které obsahují 6-7 % nadouvadla (pentan). Ke zpěňování této suroviny dochází v předpěňovacích zařízeních, kde působením páry při teplotách 80–100 °C klesá objemová hmotnost materiálu přibližně z 630 kg.m⁻³ na 9-40 kg.m⁻³. V průběhu tohoto procesu se zvětší perličky suroviny až padesátkrát a uvnitř perliček vznikne buněčná struktura. Dále jsou předpěněné perličky dopraveny do blokové formy, kde se vzájemně svaří a vytvoří kompaktní blok.



Obr. 13 Předpěňovací zařízení [37]

Po ochlazení je blok vyjmut, uskladněn a připraven k dalšímu zpracování (např. řezání odporovým drátem na přesné formáty). Následně je polystyrenový blok dopraven do modeláren, kde je obráběn na požadovaný tvar. V modelárnách je nejčastěji polystyrenový blok obráběn pomocí CNC zařízení, kde jsou využívány speciální duté nástroje, kterými se odsávají jemné částice polystyrenu vznikající právě při obrábění. Vznikající odpad dodnes nenalezl vhodné využití, což je patřičnou nevýhodou této technologie.

Pro slévarenské účely jsou nejvýhodnější typy polystyrenu *EPS LPM 20* a *EPS LPM 30*. Tyto polystyreny se vyznačují nízkou měrnou hmotností (*EPS LPM 20* = 20-22 kg.m⁻³ a *EPS LPM 30* = 30–32 kg.m⁻³) a neobsahují látky, které snižují hořlavost.

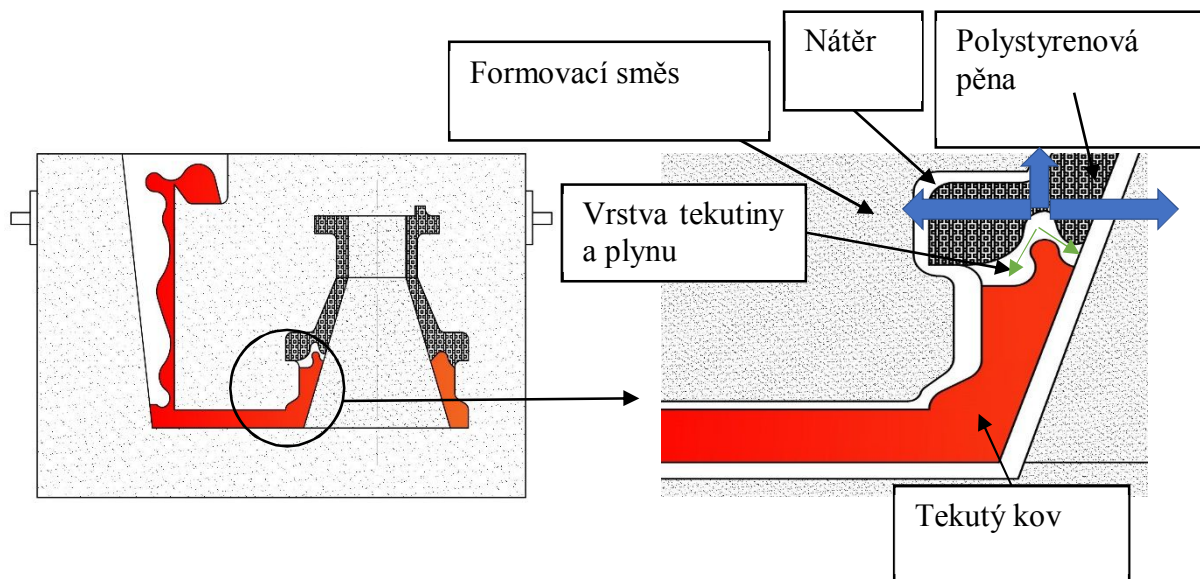
2.1.2 Technologická příprava modelu a lití [35]

Jakmile je zhotovený model dopraven do slévárny technolog určí, jakým způsobem bude odlitek odléván, zkontroluje celistvost modelu, rozhodne o způsobu jeho zaformování, zvolí vhodný formovací rám, rozmístí nálitky tak, aby bylo zajištěno dostatečné dosazování kovu, určí dostatečný počet průduchů k umožnění úniku plynů vznikajících při lití, spočítá hmotnost kovu, který je potřeba pro daný odlitek a další aspekty týkající se lití na vypařitelný model. Po technologickém uvážení je model přichystán k zaformování a následnému lití.

K formování se nejvíce využívají samotuhnoucí směsi II. generace s organickými pojivy (furanové a fenolové pryskyřice). Při lití dochází k úniku škodlivých látek z formy i z polystyrenového modelu (benzen, formaldehyd, toluen, xylen, etylen, oxid uhelnatý, oxid siřičitý, ...), tím může být způsobeno výrazné znečištění pracovního prostředí. Dalším rizikem je uzavření plynu například v hluboké kapse vytvořené formy, kdy může dojít až k jeho explozi. Například ve firmě Focam s.r.o., pokud je to možné a nedojde tím ke zhoršení kvality odlitku, polystyrenový model před litím mechanicky odstraňují. Mechanické odstranění modelu závisí na jeho velikosti a složitosti. I při vyjmutí modelu z formy jej nelze opětovně použít a při jeho vyjímání je zničen.

Při lití do forem se zaformovaným polystyrenovým modelem dochází ke zmenšování objemu polystyrenových perliček a zhroucení jejich struktury. Při teplotách okolo 650 °C je struktura EPS modelu proměněna ze 40 % na plynnou složku a z 60 % na viskózní složku (saze). Viskózní část se při zvyšující se teplotě dále mění na tekavé látky. Probíhající přeměny polystyrenu na tekavé látky jsou velice rychlé a mezi sebou splývají.

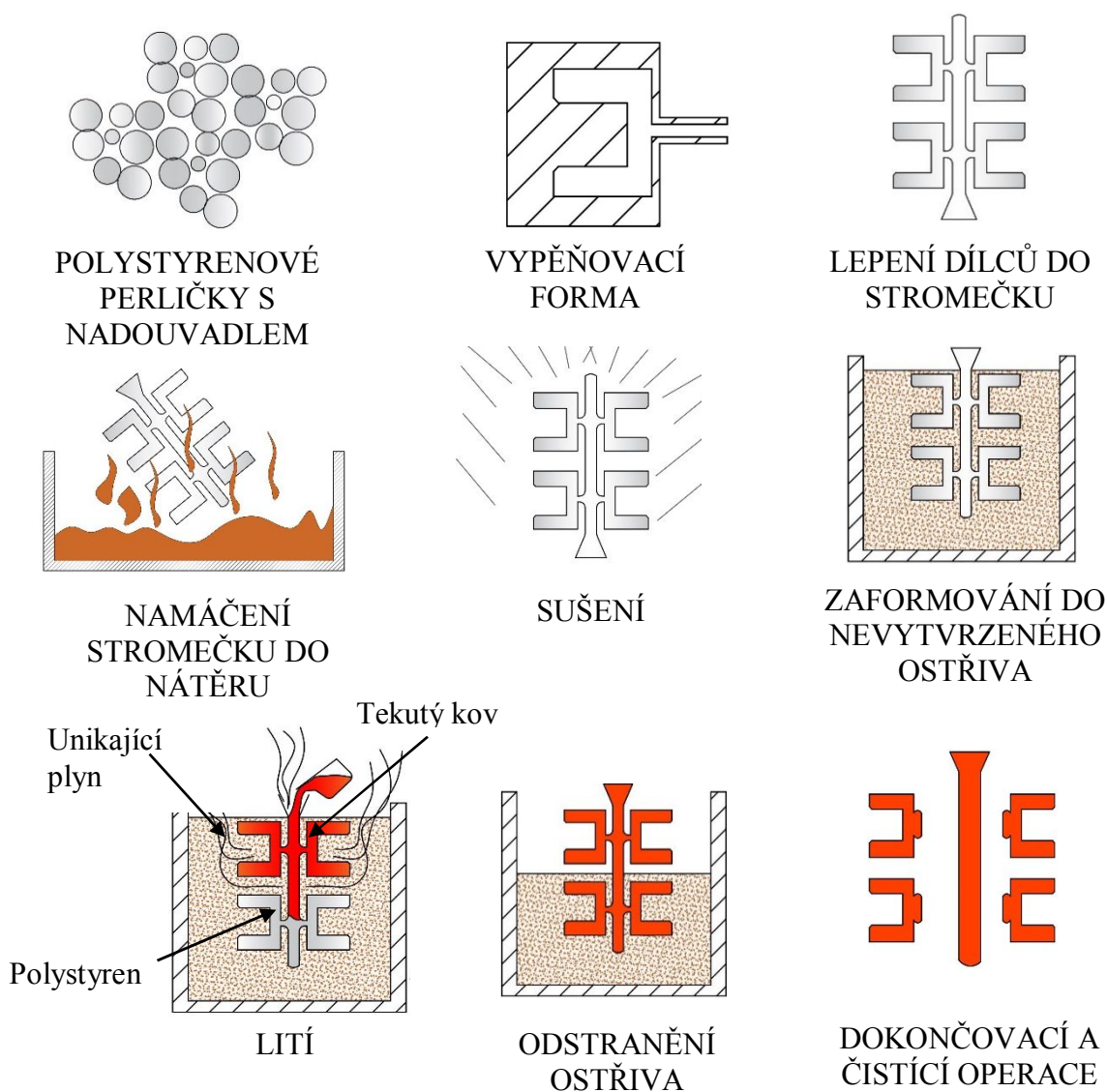
Výhodou oproti tradičnímu odlévání do pískových forem je možnost odlévat tvarově složité odlitky u kterých není potřeba model nebo modelová zařízení, jaderníky apod. Při klasickém lití do písku je nutné vyrobit model a poté před litím model vyjmout. K vyjmutí se využívají technologické úkopy. Do vytvořené dutiny se dále zakládají jádra, která vytváří další dutiny či tvary, které není možné zhotovit přímo na modelu. Tradiční modely, na rozdíl od polystyrenových, lze používat opakovaně a svou výhodou mají při střední až velkosériové výrobě. Nicméně vypařitelný model také nachází u některých druhů odlitků uplatnění i při větších sériích. Jedná se o technologii Lost Foam (Ztracená pěna).



Obr. 14 Únik plynů při lití [34]

2.1.3 Vypařitelný model pro sériovou výrobu „Lost Foam“ [38]

Technologie Full Mold se nadále rozvíjela a v 80. letech došlo k velkému inovačnímu kroku. Metoda na vypařitelný model se začala využívat ve velkosériové výrobě. Nejdříve v Japonsku a v USA. V USA se o vývoj metody Lost Foam například zasloužil výzkumný projekt Saturn, který spočíval ve výrobě komplikovaných sériových dílů pro automobilový průmysl. Při sériové výrobě je polystyren opakovaně vyráběn ve vypěňovací formě, proto je pro slévárnu dobré mít vlastní zpěňovatelné zařízení. Poté je většinou model zkompletován z důvodu složitosti některých tvarů odlitku, které nelze vyrobit v jedné formě a je nutné model slepovat z více částí. U malých odlitků jsou modely skládány do stromečku spojením na společnou vtokovou soustavu ze stejného materiálu. Model je namáčen do speciálního nátěru a následně je sušen. Po usušení nátěru je model zavibrován do křemičitého ostřiva bez pojiva. Jako materiál pro výrobu polystyrenových modelů se využívá expandovatelný polystyren EPS (pro slitiny Al), materiál PMMA nebo materiál copolymer (pro ocelové odlitky a litiny).



Obr. 15 Postup výroby „Lost Foam“ [39]

2.1.4 Porovnání

Technologie vypařitelného modelu je využívána zejména ke zhotovování odlitků pro kusovou až malosériovou výrobu – **Full Mold**. Vývojem této technologie je od 80. let možné vyrábět odlitky i ve velkých sériích – **Lost Foam**. Při velkosériové výrobě je nutností mít k dispozici zpěňovací zařízení a kovové formy na výrobu polystyrenových modelů.

Tab. 5 Výhody a nevýhody lití na vypařitelný model

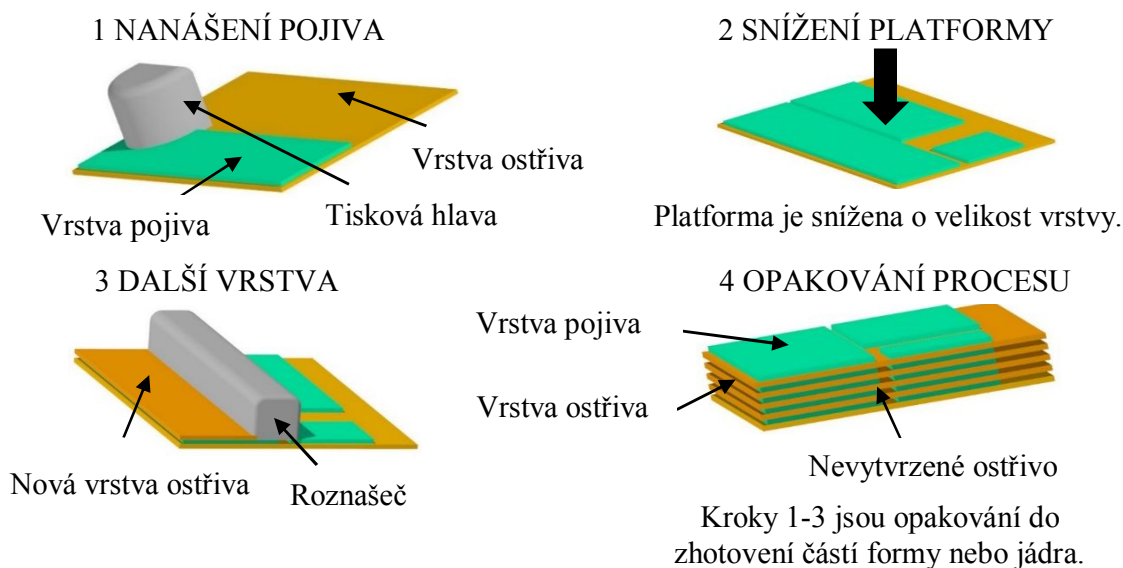
| | |
|--|--|
| + Rychlá výroba polystyrenového modelu | - Model nelze opakovaně použít |
| + Tvarová volnost | - Hrozí uzavření plynů ve formě |
| + Volnost při změně technologie | - Zhoršené pracovní prostředí při lití |
| + Netřeba technologických úkosů | - Horší povrch odlitku oproti klasickému formování |

2.2 Přímá výroba forem 3D tiskem písku „3D Sand Printing“ [40], [41]

3D tisk písku (3D Sand Printing) umožňuje výrobu pískových forem a jader ke slévarenským účelům přímo z digitálních CAD dat. Po vytvoření těchto dat je možné formu nebo jádro tisknout na speciální tiskárně. Zdánlivě tak odpadá potřeba modelů, jaderníků a modelových zařízení. Příslibem této technologie je ušetření času, snížení možnosti vzniku chyb i nepřesností, získání větší volnosti při konstruování forem a jader, ušetření místa ve skladech modelů a modelových zařízení, snížení nákladů na údržbu modelů a modelových zařízení apod.

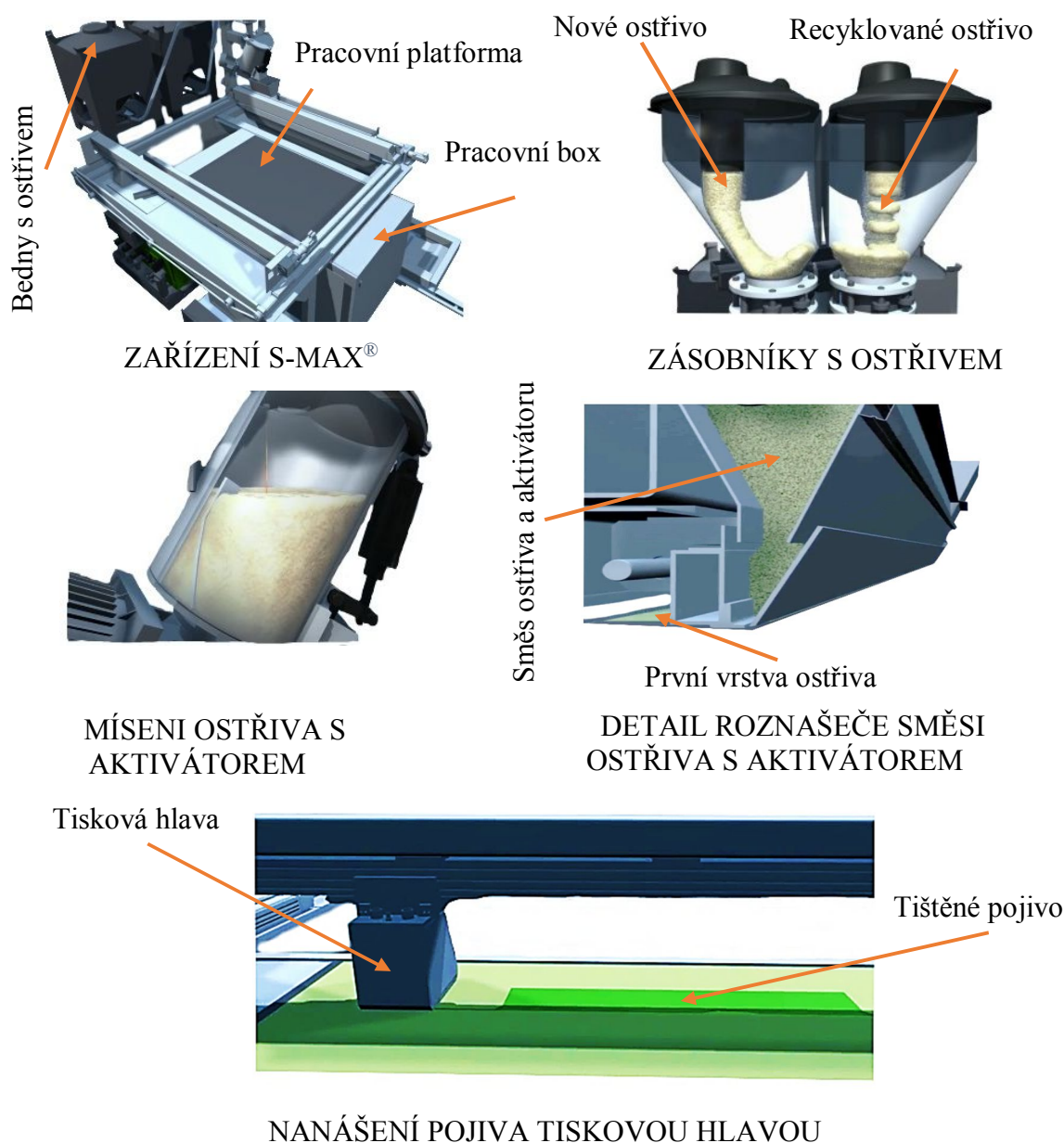
2.2.1 Princip technologie

Metody, u kterých dochází k nanášení pojiva na vrstvu prášku jsou nazývány Binder-Jetting. 3D Sand Printing je založený právě na tomto principu, kdy je na nanesenou vrstvu ostřiva selektivně nanášeno pojivo. Roznašečem se roznese tenká vrstva ostřiva obaleného vrstvičkou aktivátoru. Tloušťka vrstvy závisí na velikosti zrna ostřiva a na možnostech tiskárny. Na tuto roznesenou vrstvu je na přesně určená místa nanášeno pojivo za pomoci tiskové hlavy. Po dokončení prvního kroku, tj. ukončení tisku tiskovou hlavou, je platforma snížena právě o tloušťku další vrstvy. Tím se uvolní prostor pro pokračování tisku. Po snížení platformy je opět roznašečem rozprostřena další vrstva, na kterou je znovu nanášeno pojivo. Celý průběh se opakuje, dokud nejsou části k vytištění zhotoveny. Proces tisku je znázorněn na Obr. 16.



Obr. 16 Princip technologie „Sand Printing“ [41]

Ve výukovém videu od společnosti ExOne je znázorněn podrobnější proces tisku (Obr. 17). Z beden, kde je uskladněno ostřivo, je ostřivo vakuově dopraveno do dvou zásobníků. Jeden zásobník slouží k umístění recyklovaného ostřiva, druhý je určen pro nové ostřivo. Pod pojmem recyklované ostřivo je myšleno ostřivo, které není vytvrzeno pryskyřicí a po dokončení procesu je odsáto průmyslovým vysavačem a následně uskladněno k dalšímu použití. Z těchto zásobníků je ostřivo přemístěno do mísiče, kde se tyto dva druhy ostřiv smíchají a obalí se vrstvičkou aktivátoru. Takto zhotovená směs je dopravena pomocí šnekového dopravníku do roznašeče. V průběhu zmíněných procesů je pracovní box s pracovní platformou zasunut do pracovní komory, kde následně probíhá tisk již zmíněným způsobem.



Obr. 17 Postup tisku na zařízení S-Max® [42]

2.2.2 Společnosti zabývající se technologií „3D Sand Printing“ [43], [44], [45], [46], [47]

Největšími výrobci tiskáren přímého tisku slévárenských forem a jader jsou Německé společnosti ExOne a Voxeljet. V České Republice se 3D tiskem písku zabývají například společnosti Modelárna Liaz spol. s.r.o. z Liberce, 3Dtiskárna v Turnově a METOS v.o.s. sídlící v Chrudimi.

ExOne a VoxelJet jsou německé firmy se společnou historií. V roce 1999 byla založena start-up společnost Generis zabývající se litím do pískových forem a litím na ztracený model. Společnost Generis sídlila v německém Augsburgu a v roce 2001 bylo prodáno jejich první tiskové zařízení do BMW. O dva roky později došlo k rozdělení této společnosti na dvě samostatné firmy ProMetalRCT a Voxeljet. Přičemž ProMetalRCT je nyní uváděn jako ExOne a zabývá se převážně výrobou zařízení pro tisk pískových forem, tiskem pískových forem a dalšími aditivními technologiemi.

Voxeljet je společnost specializující se zejména na metody přesného lití. Dle webových stránek firem a mailové korespondence (Příloha 1 12/13) lze objasnit nynější vztah mezi oběma firmami. Voxeljet je vlastníkem patentu na technologii 3D Sand Printing. ExOne, na základě dohody, využívá patentu firmy Voxeljet pro rozvoj technologie 3D Sand Printing. Technologie obou firem je tedy založena na vytvrzování práškových materiálů (BJ). ExOne používá základní práškové materiály kovové, keramické a slévárenská ostřiva. Voxeljet se specializuje hlavně na tisk plastových materiálů (PMMA), ale také na tisk slévárenských forem. ExOne i Voxeljet disponují pobočkami a zprostředkovatelskými společnostmi po celém světě.

Modelárna Liaz spol. s.r.o. Hlavní činností této společnosti je vývoj, konstrukce a výroba dílů, nástrojů a přípravků pro automobilový, energetický a letecký průmysl. Dále poskytují své služby ve slévárenském průmyslu, designu, umění a architektury. Modelárna Liaz se také v rámci vývojových a výzkumných projektů podílí na zpracování nových technologií v oblasti informatiky, managementu, materiálového inženýrství a nástrojářství. Firma dále disponuje několika specializovanými pracovišti a zařízeními jako je například tiskárna pro přímý tisk pískových forem a jader, 5-osé frézovací zařízení, PUR licí pracoviště, svařovacím pracovištěm (CO₂, TIG, mikro TIG pulsní a mikro laserovém svařování) nebo vlastní slévárnou hliníku pro kusovou a malosériovou výrobu.

3Dtiskárna je česká firma, která se zabývá stavbou prototypových modelů a jejich povrchových úprav. 3Dtiskárna disponuje několika tiskovými zařízeními a je schopna tisknout velkou škálu materiálů. Společnost se také zabývá gravitačním litím kovů do písku, přesným litím kovů a skla, vakuovým litím reaktoplastů a výrobou gumových výrobků z reaktoplastu.

METOS v.o.s. (Metalurgický technicko-obchodní servis) je firma zabývající se obchodní činností, technologickým servisem pro slévárny a zastupováním zahraničních společností na českém slévárenském trhu. METOS v.o.s. také řeší zpracování technické přípravy výroby technologicky náročných odlitků za využití 3D modelovacích a simulačních softwarů pro počítačovou simulaci lití a tuhnutí odlitku (SolidWorks a Nova Flow&Solid). METOS v.o.s. spolupracuje a zastupuje firmy jako Rio Tinto Iron & Titanium, SNAM ALLOYS PVT Ltd., KOINS Co., Ltd., NOVACAST Foundry Solutions AB, Soft Center, ABM Foundry Engineering a také ExOne GmbH.

2.2.3 Seznam zařízení pro přímý tisk pískových forem a jader [48], [49]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.2, největšími výrobci tiskových zařízení pro přímý tisk pískových forem a jader jsou německé společnosti ExOne a Voxeljet. Seznam jejich zařízení je uveden v Tab. 6 a podrobnější parametry jednotlivých tiskáren jsou uvedeny v souboru „Příloha 1 1-11/13“. Tiskárny se odlišují svou velikostí, velikostí pracovního boxu, rychlostí tisku a nastavitelností tloušťky tištěné vrstvy.

Tab. 6 Seznam zařízení pro přímý tisk pískových forem a jader

| SEZNAM ZAŘÍZENÍ PRO PŘÍMÝ TISK PÍSKOVÝCH FOREM A JADER | |
|---|---|
| <i>Voxeljet</i> | <i>ExOne</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> • VX200 • VX1000 • VX2000 • VX4000 | <ul style="list-style-type: none"> • X1 Exerial • X1 S-Max[®] Furan • X1 S-Max + Phenolic • X1 S-Print Furan • X1 S-Print Phenolic • X1 S-Print Silicate |

2.2.4 Přísady potřebné k vytištění slévárenské směsi [50], [51], [52], [53]

Komponenty pro výrobu směsí jsou speciálně upraveny pro tiskárnu tak, aby byly docíleny požadované vlastnosti forem a zároveň aby byla zachována dostatečná životnost tiskárny. K tisku jsou používána ostřiva, pojiva, aktivátory a čističe tiskové hlavy přímo od výrobce. Tento fakt je promítnut na cenách těchto speciálně upravovaných komponentů, které jsou výrazně vyšší než komponenty pro klasickou výrobu forem. Samotný tisk je náročný například pro tiskovou hlavu, která má garantovanou životnost 1 rok a následně je nutné zakoupit od výrobce novou. Porovnání cen komponentů pro zhotovení klasické furanové směsi s komponenty pro 3D tiskárny je uvedeno v Tab.7.

Tab. 7 Porovnání cen formovacích směsí

| | KLASICKÁ FORMOVACÍ SMĚS | SMĚS DO ExOne |
|----------------------------|-------------------------|---------------|
| FURANOVÁ PRYSKYŘICE | 1,6 EUR/kg | 23 EUR/kg |
| AKTIVÁTOR | 1 EUR/kg | 21 EUR/kg |
| KŘEMIČITÝ PÍSEK | 44 EUR/t | 500 EUR/t |

A) Slévárenská ostřiva používaná u „3D Sand Printing“

Zařízení od společnosti Voxeljet využívají křemičitá ostřiva pod označením GS XX (přičemž XX představuje číslo značící velikost zrna viz „Příloha 1 11/13“) a Kerphalite KF. Kerphalite KF je ostřivo na bázi hlinitokřemičitanu, které se vyznačuje dobrou tepelnou vodivostí, brání nadměrné roztažnosti a je vhodný pro většinu pojivových systémů. Společnost ExOne také nabízí křemičitá ostřiva i Kerphalit KF a navíc disponuje syntetickými ostřivy, která jsou uměle vytvořená a jejich chemické složení se od každého výrobce liší a často není přesné složení známo. ExOne pro ostřiva používá značení FS0XX viz „Příloha 1 5/13“.

Tab. 8 Chemické složení ostřiv [50], [53], [54]

| CHEMICKÉ SLOŽENÍ | | |
|---|--------------------------------------|----------------|
| | Křemičitá ostřiva např. GS XX [%] | KERPHALITE [%] |
| Fe ₂ O ₃ | 0,15 | 0,5 |
| Al ₂ O ₃ | <0,2 | 61 |
| TiO ₂ | <0,2 | - |
| SiO ₂ | 98,3 | 38 |
| K ₂ O, Na ₂ O, MgO, CaO | - | <0,5 |

B) Pojivové systémy používané u „3D Sand Prining“

Technologie 3D Sand Printing využívá k tisku forem a jader směsi druhé generace. Zejména pojiva na bázi fenolových a furanových pryskyřic, ale také pojiva na bázi vodního skla. Směsi na bázi vodního skla a fenolových pryskyřic je nutné po vytištění vytvrzovat mikrovlnným ohřevem. Zatímco do forem zhotovených ze směsí na bázi furanových pryskyřic lze ihned po vytištění, odstranění nevytvrzeného ostřiva a složení formy odlévat. Směsi na bázi furanových pryskyřic samovolně tuhnou, a tudíž nepotřebují být vytvrzovány dalším zásahem zvenčí.

Tab. 9 Roztřídění formovacích směsí II. Generace

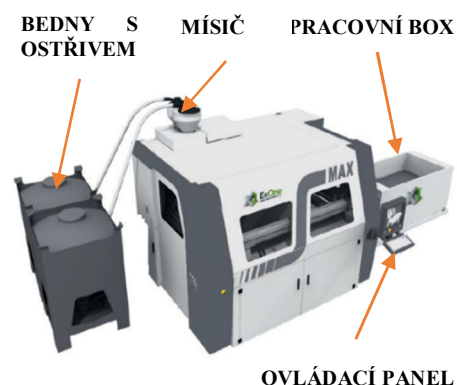
| II.GENERACE | | |
|---|---|--|
| Výroba keramických forem | Samo-tvrdnoucí směsi | Vytvrzování zásahem zvenčí |
| <ul style="list-style-type: none"> - Vytavitelný model - Spalitelný model - Oblévání keramikou | ORGANICKÁ POJIVA <ul style="list-style-type: none"> - <i>Vytvrzované kyselinami</i> <ul style="list-style-type: none"> a) Furanové b) Fenolformaldehydové - <i>Na bázi uretanových pryskyřic</i> <ul style="list-style-type: none"> a) Alkyd – uretanové b) Fenoluretanové | <ul style="list-style-type: none"> - CO₂ Proces - Cold Box - SO₂ Proces - Hot Box - „C“ Croning |
| | ANORGANICKÁ POJIVA <ul style="list-style-type: none"> - Sádra - Cement - Vodní sklo | |

2.2.5 Zařízení ExOne S-Max® [40], [41], [55], [56]

Tiskárna ExOne S-Max® byla navržena k tisku slévárenského ostřiva a stavbě komplexních a přesných slévárenských forem a jader přímo z CAD dat, což eliminuje nutnost výroby slévárenského modelu. Jako pojivo používá furanové pryskyřice, které se nemusí dále vytvrzovat a již po vytisknutí je forma nebo jádro připraveno k lití.

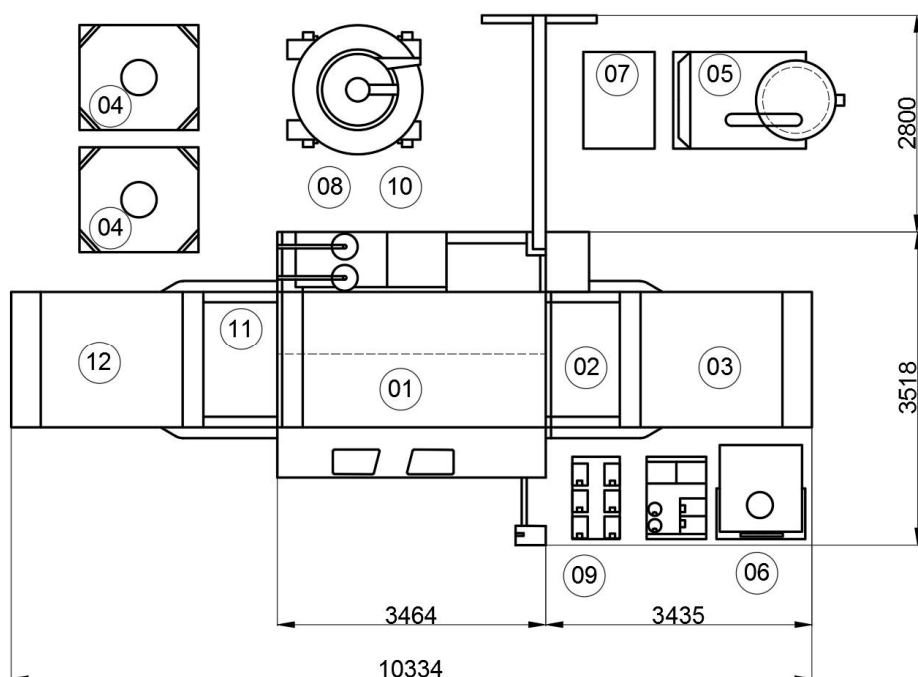
Tab. 10 Parametry zařízení S-Max® [56]

| Parametry | |
|-------------------------|-------------------------|
| Pracovní box | 1800 x 1000 x 700 mm |
| Rychlost tisku | 60-85 L.h ⁻¹ |
| Tloušťka vrstvy | 280–500 µm |
| Vnější rozměry tiskárny | 6900 x 3520 x 2860 mm |
| Váha tiskárny | 6500 kg |
| Formát digitálních dat | STL |
| Přesnost formy | ± 0,3 mm |
| Pojivo | Furanová pryskyřice |
| Cena | 1 000 000 EUR |



Obr. 18 Zařízení S-Max® [56]

Ke správnému a bezporuchovému chodu tiskárny slouží další přídatná zařízení jako například průmyslové vysavače, náhradní pracovní box, dávkovače, stůl na dokončovací práce, přesuvná zařízení apod.



Obr. 19 Rozmístění tiskárny a přídatných zařízení [41], [55]

Tab. 11 Popis zařízení a rozložení tiskárny ExOne S-Max[®] [41], [55]

| | |
|--|---|
| 01 3D TISKÁRNÁ S MÍSIČEM | 02;11 DOPRAVNÍK – přesouvá pracovní box do pracovní komory a zpět |
| 03;12 PRACOVNÍ BOX – 2 boxy pro větší produktivitu práce | 04 BEDNY PRO NOVÉ OSTŘIVO |
| 05 PRŮMYSLOVÝ VYSAVAČ | 06 POJIZDNÝ ZÁSOBNÍK A SEPARÁTOR AKTIVOVANÉHO OSTŘIVA |
| 07 ZDROJ NEPŘERUŠOVANÉHO NAPĚTÍ (UPS) | 08 CYKLON VRATNÉ SMĚSI |
| 09 ZÁSOBNÍKY PRO USKLADNĚNÍ PŘÍRAD – aktivátor, pojivo, čistící kapaliny | 10 BEDNA PRO RECYKLOVANÉ OSTŘIVO |

Každý druh tiskárny je určený pro jiný druh pojiva, aktivátoru a ostřiva. Seznam rozdělení přísad a tiskáren je uveden v části „Příloha 1 1-11/13“. Vlastnosti forem a jader pro tiskárnu S-Max[®] jsou uvedeny v tabulce Tab. 12.

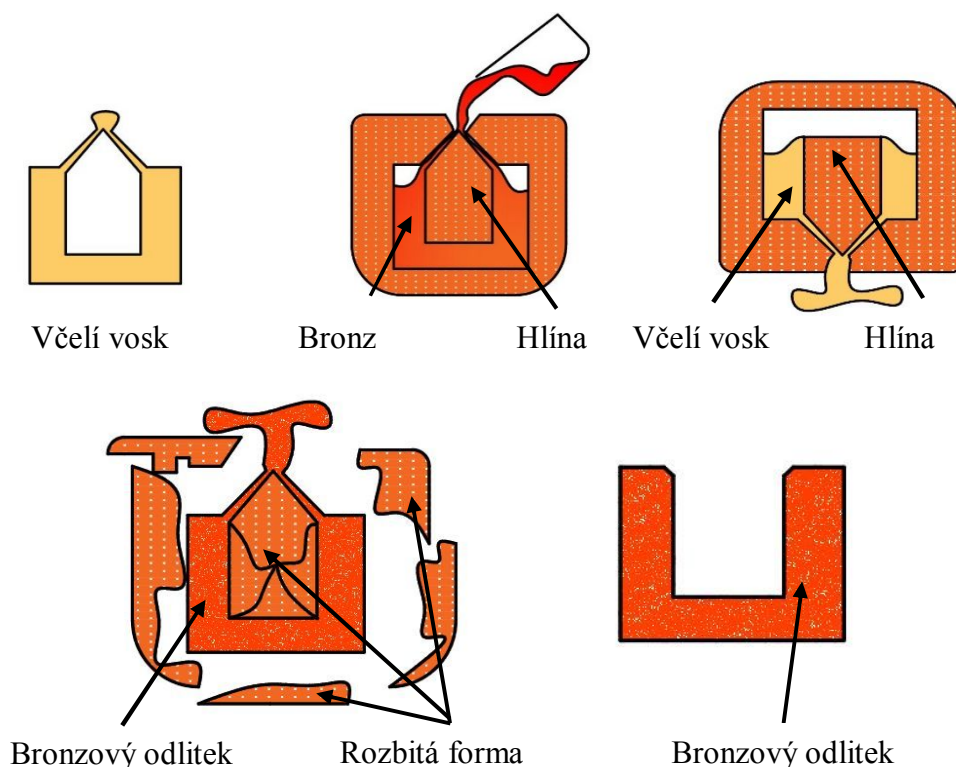
Tab. 12 Vlastnosti vytištěné formy nebo jádra zařízením ExOne S-Max[®] [55]

| Obecné informace | Furanové pryskyřice |
|---|--|
| Pevnost formy | 180-220 N/cm ² |
| Přesnost formy/jádra | ± 0,3 mm |
| Odlévaný materiál | Vhodnost |
| Litina | vhodné |
| Slitiny Al | vhodné |
| Slitiny Cu | vhodné |
| Ocel | omezené |
| Vlastnosti formy | ☺ -špatné ☺ ☺ - dobré ☺ ☺ ☺ - vynikající |
| Teplotní stabilita | ☺ |
| Pevnost po vytvrzení (za studena) | ☺ ☺ |
| Rozpadavost formy | ☺ ☺ ☺ |
| Odolnost vůči vztlaku | ☺ |
| Stabilita formy při skladování | ☺ ☺ |
| Hygroskopické vlastnosti | ☺ |
| Ostrost hran | ☺ ☺ |
| Odolnost proti otěru | ☺ ☺ |
| Použití křemenného ostřiva | FS001 – FS003: Automobilový průmysl, velké odlitky, letecký průmysl, výroba čerpadel |
| Ostřiva na bázi hlinitokřemičitanu | FS051: Velmi vhodné při lití za vysokých teplot |

2.3 Technologie vytavitelného modelu za využití aditivních technologií [57]

Technologie vytavitelného modelu spočívá ve vytvoření skořepinové formy za využití voskového modelu, který je před litím vytaven. Tato technologie je známa již řadu tisíciletí. První zmínky sahají do roku 5000 př.n.l. Umělecká díla, která byla v této době odlévána, byla zhotovována principiálně stejným způsobem jako v současnosti. Jako model sloužil včelí vosk, na který byla nanесena vyhovující hlína, která posloužila jako forma. Vosk se následně nechal vytavit, čímž vytvořil dutinu, do které se odléval bronz. Původní princip odlévání na vytavitelný model je znázorněn na Obr. 20.

Výsledné odlitky se vyznačují vysokou přesností a jejich téměř dokonalým povrchem. Vzhledem k faktům technologie vytavitelného modelu (vytavování vosku, vysoká přesnost, dokonalý povrch, obalování keramikou) se v odborné literatuře vyskytují názvy popisující technologii jako: „Technologie vytavitelného modelu“, „Technologie přesného lití“, „Technologie na ztracený vosk“ nebo „Výroba odlitků téměř na hotovo“. V anglické odborné literatuře lze metody vytavitelného modelu vyhledat pod názvy „Investment casting“, „Near-Net-Shape“, „Lost-wax casting“ apod. Vzhledem k rozvoji nových technologií založených na počítačové podpoře lze zhotovovat keramické formy, vytavitelné modely nebo primární modely aditivním způsobem (3D tiskem). Příslibem moderních technologií je výrazná úspora času, možnosti testování nových produktů nebo možnost rychlejší reakce na nečekané změny konstrukce výrobků.



Obr. 20 Původní princip odlévání bronzového modelu na ztracený včelí vosk [57]

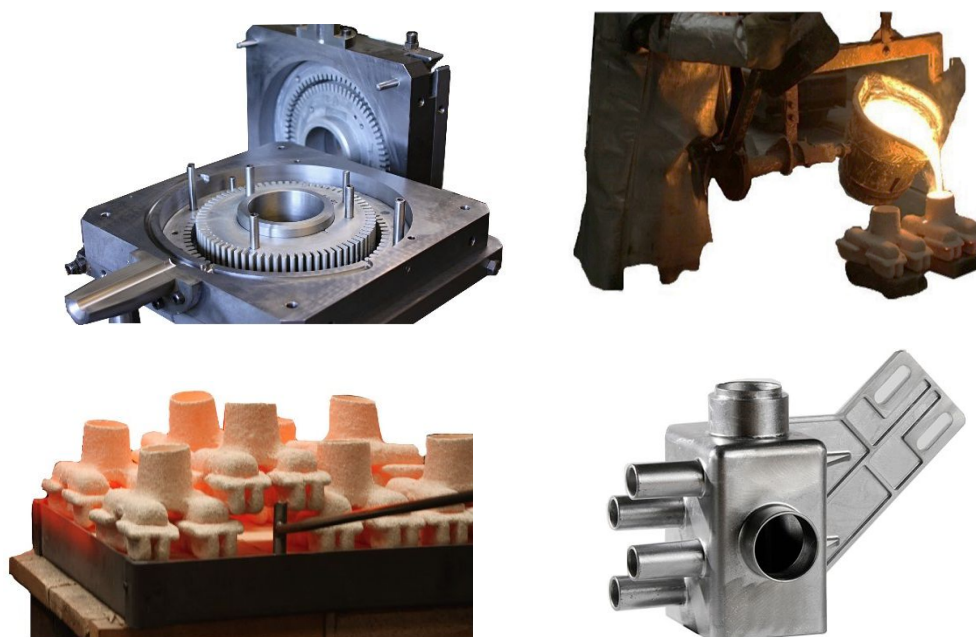
2.3.1 Princip zhotovování odlitků technologií vytavitelného modelu [57], [58], [59]

Princip odlévání vytavitelného modelu v současnosti začíná výrobou kovové matečné formy obráběním, odléváním, galvanoplasticky, metalizováním nebo některou z aditivních metod. Do zhotovené matečné formy se dopraví nový vosk (panenský), který se buďto do formy odstříkne za zvýšeného tlaku 0,5 až 1 MPa, nebo je tekutý vosk odstříknut za tlaku 2,5 až 5 MPa anebo je zhotovován gravitačním litím. Každý ze způsobů dopravování vosku do matečné formy probíhá při jiné teplotě tekutého vosku. Voskový nebo plastový model může být také vytištěn pomocí 3D tisku.

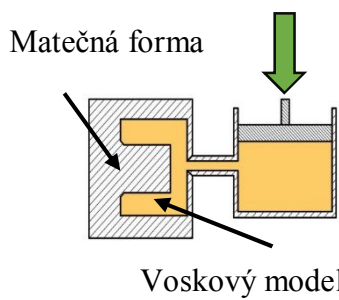
Po minimálně 24 hodinách (po tzv. stabilizaci voskového modelu) jsou voskové modely pájeny/lepeny na vtokovou soustavu do stromečku. Vtoková soustava je většinou zhotovována z již použitého vosku (regenerovaného vosku). Dle tvaru, velikosti a složitosti výsledného stromečku je určována technologie lití, způsob obalování keramikou, způsob vytavování voskového modelu, způsob lití i oddělování odlitků od vtokové soustavy.

Takto zhotovený stromeček je v dalším kroku namáčen do keramické břechky (pojiva – alkosoly či hydrosoly) a do tzv. plniva (křemenná moučka). Poté se okapaný stromeček obsypává posypovým materiálem (ostřivem). Vzniklé obaly se nechávají sušit na vzduchu za řízené teploty, řízeném proudění vzduchu a vlhkosti nebo působením čpavku (činitdlo plynného skupenství).

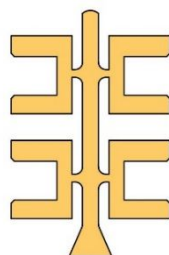
Vysušenou formu je následně nutné oddělit od vosku jeho vytavením. Vytavování voskové hmoty se provádí za vysoké nebo nízké teploty. Vytavování za vysokých teplot probíhá v peci při minimálně 750 °C. Vytavování za nízkých teplot probíhá ve vodě, v autoklávu v přehřáté páře, v poli vysokofrekvenčních oscilací nebo proudem teplého vzduchu do středu voskového modelu. Forma zbavená voskové hmoty se vyžihá. Dojde tak k odstranění zbylého vosku a k převedení amorfnní formy na formu krystalickou. Odlévání probíhá ve vakuu nebo na vzduchu. Odlévá se ihned po vytažení forem z pece (při teplotě forem 700 až 800 °C) nebo do studených forem při teplotě okolí. Za studena nelze odlévat do křemenných forem, kde hrozí jejich popraskání. Po odlévání následují dokončovací operace, především oddělování odlitků od vtokové soustavy.



Obr. 21 Technologie vytavitelného modelu [60], [61]



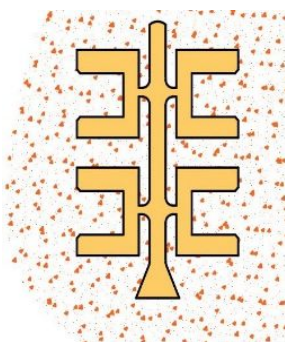
VSTŘIKOVÁNÍ VOSKU
DO MATEČNÉ FORMY



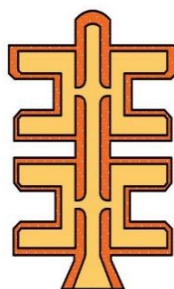
VOSKOVÉ MODELKY
VE „STROMEČKU“



NAMÁČENÍ MODELŮ DO
KERAMICKÉ BŘEČKY



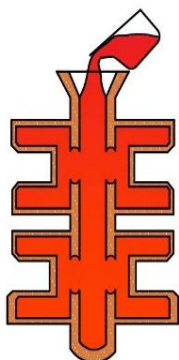
POSYP OSTŘIVEM



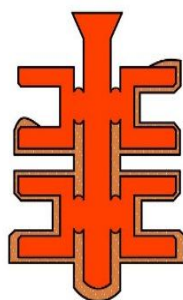
ZHOTOVENÁ SKOŘEPINA



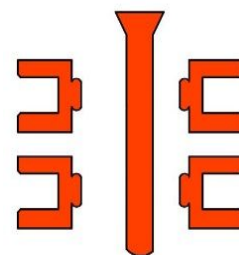
VYTAVENÍ A ŽIHÁNÍ



LITÍ



ODSTRANĚNÍ KERAMICKÉ
SKOŘEPINY

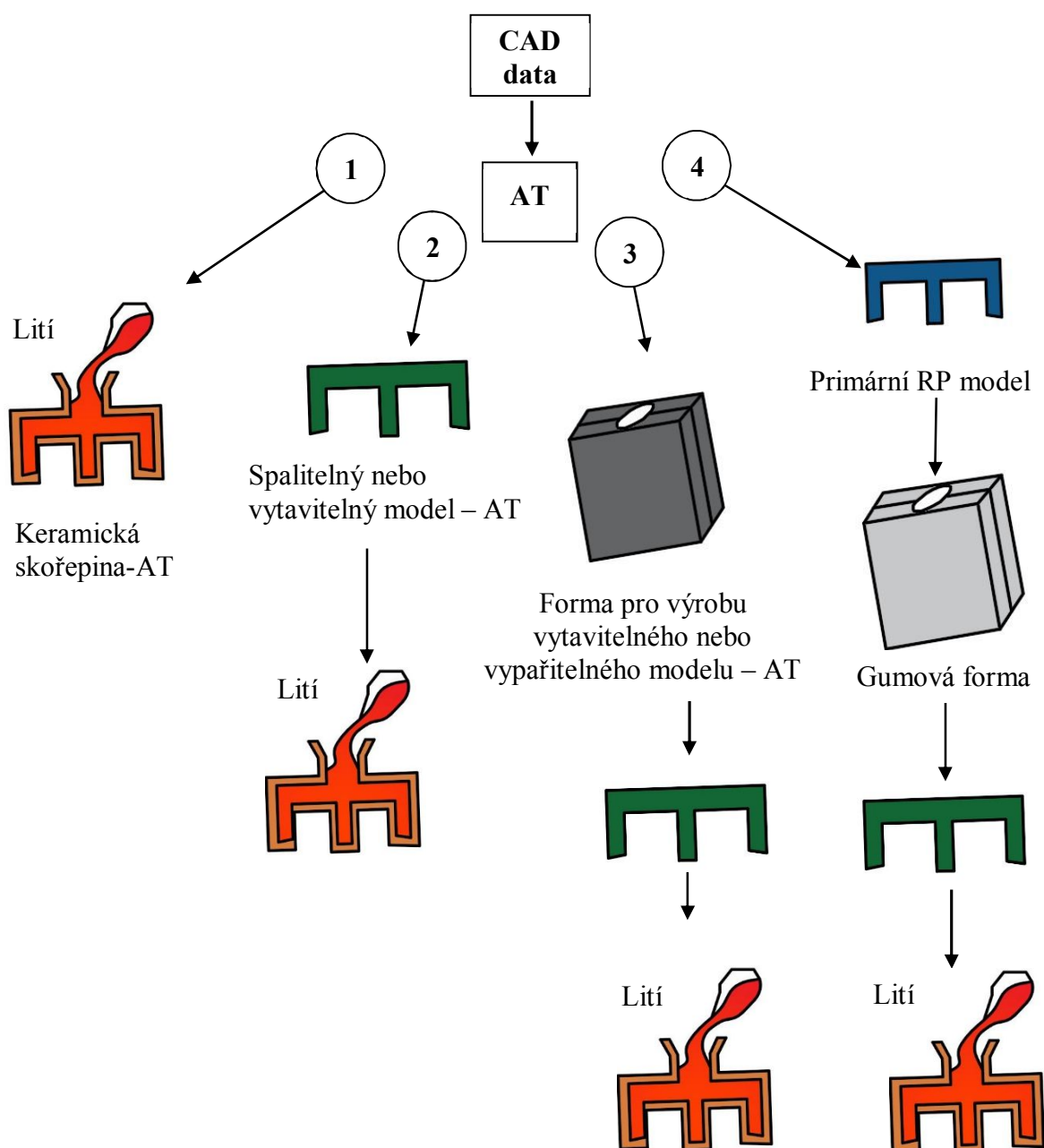


DOKONČOVACÍ
OPERACE

Obr. 22 Postup technologie vytavitelného modelu [57]

2.3.2 Využití aditivních technologií u technologie přesného lití [18], [59], [62]

AT se u přesného lití využívá zejména k úspoře času, nákladů a práce při zhotovování matečných forem a modelů. V současnosti existují čtyři cesty, kterými lze zhotovit skořepinovou formu. První cestou je přímé zhotovení keramické skořepiny, která je připravena k okamžitému lití. Druhá cesta spočívá ve vytištění vytavitelného/spalitelného modelu, přičemž výroba skořepinové formy je zhotovována již tradičním způsobem. Třetím způsobem je přímé zhotovení formy, do které se následně odlévá vosk a výroba skořepinové formy pak probíhá klasickým způsobem. Posledním postupem je aditivní výroba modelu, dle kterého lze zhotovit několik gumových forem.



Obr. 23 Možnosti využití aditivních technologií pro přesné lití na vytavitelný model [62]

2.3.3 Aditivní technologie u lití do skořepinových forem [18], [63]

Kapitola 2.3.2 poukazovala na čtyři cesty zhotovování odlitků na vytavitelný model při využití aditivních technologií. V této kapitole budou tyto cesty zhotovování odlitků blíže specifikovány.

- Při **přímé výrobě skořepiny** je využíváno metod DLSC a DSPC, které jsou založeny na principu SLS (Selective Laser Sintering – Selektivní spékání práškových materiálů laserem).

DLSC (Direct Laser Sintering of Ceramics – Přímé spékání keramického práškového materiálu laserem) funguje na principu vytvrzování jednotlivých vrstev keramického prášku (nejčastěji na bázi zirkonu) laserem. Takto vyrobené odlitky mají dobrou rozměrovou přesnost, ale horší drsnost povrchu v porovnání s klasickou výrobou vytavitelného modelu. Největší výhodou metody je velká časová úspora.

DSPC (Direct Shell Production Casting – Přímá výroba skořepiny) spočívá v nanášení keramického prášku na platformu, pomocí roznašeče válcovitého tvaru. Na tuto nanesenou vrstvu je následně tisknuto pojivo tiskovou hlavou, která kopíruje obrys budoucí skořepiny. Vytištěnou formu je nutné očistit od nevytvrzeného keramického prášku, vyžít a následně odlít. DSPC je velmi podobná metodě BJ (Binder Jetting).

- **Nepřímá výroba skořepiny** spočívá ve vytištění plastového nebo voskového modelu. Pomocí modelu se následně vytvoří skořepina klasickým způsobem.

FDM (Fused Depositon Modeling) spadá do kategorie vytlačování materiálu, kdy je pevný materiál ve formě vláken odvíjen z cívek do tavících hlav. Do jedné z nich je odvíjen podpurný materiál, který slouží k vytváření podpor pro dutiny a převislé části modelu. Do druhé tavící hlavy je dopravován materiál stavební, který tvoří výsledný tvar modelu. Materiál je zhotoven většinou z ABS plastu a je nutné jej po vytištění přebrousit nebo ponořit do rozpouštědla a vyhladit tak povrch. ABS plast ve skořepině shoří a vytvoří popílek, který je potřeba před konečným žíháním odstranit vypláchnutím skořepiny.

Solidscape je technologie tisknoucím voskové modely. Tiskárna je složena z tiskové hlavy, malého frézovacího zařízení a dvou nádrží na stavební a podpurný materiál. Stavební a podpurný materiál je nasypán ve formě granulí do nádrží na něj určených, kde je roztaven. Rztavený materiál je poté dopraven do tiskové hlavy. Podpurný materiál je tisknut tak, aby obklopil materiál stavební (výsledný model), přičemž každá vrstva je řádně uhlazena frézovacím zařízením. Model obklopený podpurným voskem je vložen do zahřívací komory, kde je podpurný materiál odtaven. Konečný model je následně lepen na vtokovou soustavu a odlitek je dále zhotovován stejným způsobem jako u klasické výroby. Solidscape nachází uplatnění hlavně při výrobě šperku a dalších drobných odlitků.

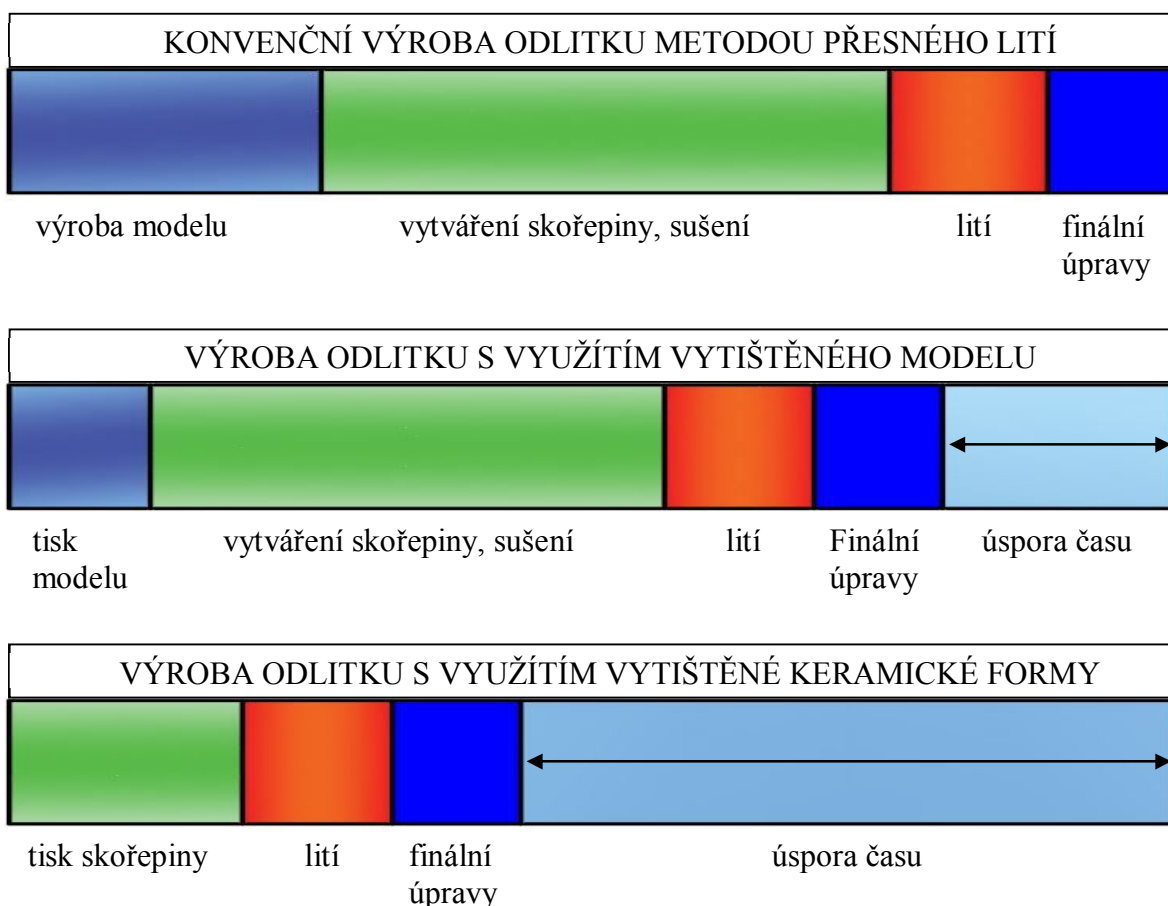
- **Výroba matečné formy pro tvorbu voskových modelů** spočívá ve vytvoření uretanové formy pro výrobu malé série voskových modelů.

Soft Tooling je technologie spočívající ve vytvoření přesného master modelu aditivními technologiemi, který je zalit uretanovou hmotou a tím vznikne matečná forma. Nevýhodou „Soft Tooling“ je menší životnost forem a nižší rozměrová stabilita než klasicky zhotovené formy. Naproti tomu je tato technologie značně rychlejší a levnější.

- **Aditivní technologie pro výrobu trvalých forem** spočívá ve spékání kovových prášků za pomoci laseru.

DMLS (Direct Metal Laser Sintering – Přímé spékání kovových materiálů) spočívá v nanášení práškového materiálu na platformu pomocí ramena s keramickým břitem. Následně laser postupně vytvrzuje kovový prášek a tvořením kontury vytváří součást. Proces probíhá v uzavřené komoře vyplněné dusíkem. Tato komora chrání materiál před oxidací. Po dokončení procesu se součástka vyjme, odstraní se podpory, povrch součásti se otryská, obrousí, vyleští nebo je obráběn k dosažení požadované rozměrové přesnosti v rozmezí $\pm 0,1$ mm.

LENS (Laser Engineered Net Shaping – Nanášení materiálu pomocí laserové konstrukce) je technologií kdy výroba modelu je započata nasměrováním laseru na kovový prášek, který je umístěn na pohyblivé podložce. Kovový prášek je za pomoci inertního plynu (nejčastěji argon) dopraven na určené místo, kde dochází k roztavení kovu laserem. Jakmile laser opustí místo tavení materiál okamžitě tuhne. Po dokončení jedné vrstvy se laserová hlava zvedne o velikost další vrstvy. Součástí zhotovené touto technologií mají skvělé materiálové vlastnosti, ale s větší velikostí se snižuje rozměrová přesnost výrobku.



Obr. 24 Časové porovnání metod přesného lití [18], [59]

3 PŘÍKLAD VÝROBY ODLITKU LITÉHO DO TIŠTĚNÉ FORMY

Společnost Armatmetal s.r.o. sídlící v Olomouci spolupracuje na nejrůznějších projektech Rapid Prototyping. Tato kapitola pojednává o realizaci odlitku ventilátoru elektromotru zhotoveného právě v této společnosti. Firmou Armatmetal s.r.o. mi byly poskytnuty veškeré informace o způsobu odlévání a zároveň mi bylo umožněno pořizovat fotografické snímky i videozáznamy. Některé z fotografií jsou v této práci zveřejněny.

3.1 Odlitek ventilátoru

Zákazník požadoval výrobu odlitku jednoho kusu ventilátoru metodou 3D Sand Printig. Ventilátor byl určen pro výrobu prototypu nového elektromotoru. Hmotnost ventilátoru je 7 kg, jeho průměr je \varnothing 520 mm. Ve spodní části ventilátoru se vyskytuje pět lopatek a v horní části ventilátoru je navrženo 9 žeber. Tato konstrukce vyžaduje v případě metody 3D Sand Printing rozdělení formy na 6 dílů ve spodní části a 10 dílů v horní části. Tato okolnost je důležitá pro dosažení požadované rozměrové přesnosti odlitku. Dalším rizikem při výrobě prototypu je dosažení zaběhnutí slitiny do tenkých a hlubokých lopatek a žeber. Pro řešení toho problému bylo využito možností metody 3D Sand Printing.

Odlitek byl odlit gravitačně do vytištěné pískové formy. Odlévaným materiálem byla slitina hliníku AlSi9Cu3(Fe) dle normy EN AB-46000.

Tab. 13 Základní informace o ventilátoru

| ZÁKLADNÍ INFORMACE O VENTILÁTORU | |
|----------------------------------|----------------------|
| Hmotnost | 7 kg |
| Průměr | \varnothing 520 mm |
| Počet lopatek | 5 |
| Počet žeber | 9 |
| Cena odlitku při sériové výrobě | cca 1500 Kč/ks |
| Cena prototypového odlitku | 56 000 Kč/ks |
| Materiál | AlSi9Cu3(Fe) |

Tab. 14 Chemické složení AlSi9Cu3(Fe)

| CHEMICKÉ SLOŽENÍ DLE NORMY EN AB-46000 [%] | | | | | | | | | |
|---|---------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Si | Fe | Cu | Mn | Ni | Zn | Pb | Sn | Ti | Mg |
| 8-11 | 0,6-1,1 | 2-4 | 0,55 | 0,55 | 1,2 | 0,35 | 0,25 | 0,2 | 0,15-0,55 |
| CHEMICKÉ SLOŽENÍ DLE JAKOSTNÍHO OSVĚDČENÍ [%] | | | | | | | | | |
| Si | Fe | Cu | Mn | Ni | Zn | Pb | Sn | Ti | Mg |
| 9,71 | 1,05 | 2,25 | 0,35 | 0,03 | 0,37 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,26 |

3.2 Realizace odlitku ventilátoru

Po obdržení objednávky ventilátoru započala příprava 3D dat a volba technologie lití vzájemnou komunikací mezi slévárnou Armatmetal s.r.o. a konstruktérskou společností Sigma Motor s.r.o. Tisk forem byl zadán společnosti Modelárna Liaz spol. s.r.o. Po vytištění byla forma přepravena do slévárny, kde byla složena, upravena a připravena k lití. Na Obr. 25 je vidět rozložená forma ventilátoru. Průběh, kterým je zhotovování prototypového odlitku realizováno, může být velmi rizikový, a proto je realizace poměrně drahá. Nicméně prototypový odlitek je většinou finančně ohodnocen tak, že v případné bezchybné výrobě se rizika slévárně mohou vyplatit, zároveň slévárna získává další zkušenosti a informace. Získané zkušenosti může slévárna dále využít při rozhodování pro případné pořízení vlastního tiskového zařízení nebo u dalšího pokračování s podobnými projekty. Při neúspěšném odlití je slévárna nucena reagovat na případné chyby například změnou konstrukce formy, objednáním nového tisku formy, změnou metalurgie apod.



Obr. 25 Vytištěná forma

3.3 Příprava vytištěné formy

Forma byla tištěna ve společnosti Modelárna Liaz spol. s.r.o. na zařízení S-Max[®]. Způsob tisku spočívá v nanášení vrstev ostřiva, které jsou spojovány selektivním tištěním pojiva, jak již bylo popsáno v kapitole 2.2.1. Při tisku slouží jako podpora nevytvrzené ostřivo, které je nutné po vytištění odstranit. Z tohoto důvodu bylo nutné vytisknout formu na mnoho částí. Forma byla rozdělena na vrchní část (vršek) a spodní část (spodek) viz Tab. 13. Vytisknuto spolu s částmi formy bylo i jádro a podpěrný kroužek. Před skládáním byly části formy očištěny, ošetřeny ochranným nástřikem a následně vysušeny. Forma z dílů byla skládána na rovné ploše (pro zajištění rovinatosti). Pro zajištění tuhosti formy, bylo nutné díly spojovat slévarenským lepidlem. Jednotlivé části formy jsou zobrazeny na Obr. 26.



Obr. 26 Jednotlivé části formy

Po kompletním složení tištěné formy je forma vložena do kovového rámu a je zasypána standardní samotuhnoucí formovací směsí. Tímto způsobem se zajistí fixace formy. Před obsypáním tištěné formy je nutné zakrýt mezery a otvory ve formě (výfuky, vtoky, nálitky), aby nedošlo ke kontaminaci dutiny formy formovací směsí. Na Obr. 27 a Obr. 28 lze vidět formu před a po obsypání formovací směsí.



Obr. 27 Forma těsně před zatížením formovací směsí



Obr. 28 Forma připravená k lití

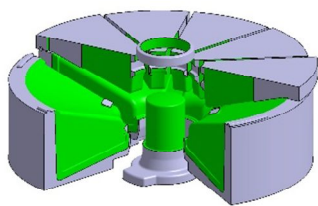
Ventilátor se odléval gravitačně za pomoci dvou pracovníků, kteří taveninu odlévali do zafixované vytištěné formy ruční páneví. Po přelití kovu z pece do pánve byla stažena hladina a změřena teplota. Po změření teploty ($780\text{ }^{\circ}\text{C}$) se začalo odlévat. Po odlití a dostatečném ztuhnutí kovu byl odlitek opatrně vytlučen z formy a následně probíhaly na odlitku dokončovací práce. Průběh přípravy formy ventilátoru až po surový odlitek ventilátoru metodou 3D Sand Printing je znázorněn na Obr. 31.



Obr. 29 Odlévání ventilátoru



Obr. 30 Surový odlitek ventilátoru



TVORBA 3D DAT



TISK



EXPEDICE A PŘEPRAVA



OCHRANNÝ NÁSTŘIK



SUŠENÍ



SKLÁDÁNÍ



PŘÍPRAVA K LITÍ



ZATÍŽENÍ



METALURGIE



LITÍ



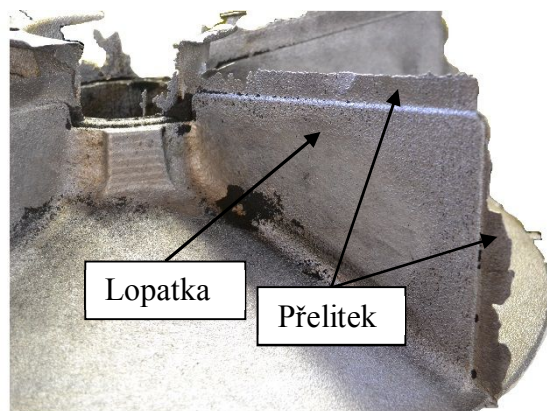
ODLITEK PO VYTLUČENÍ Z FORMY

Obr. 31 Průběh zhotovení odlitku ventilátoru do tištěné formy

3.4 Zhodnocení odlitku ventilátoru

Odlitek ventilátoru byl zákazníkem přijat bez reklamací, ačkoliv vykazoval mírné nepřesnosti způsobené technologicky nutným rozdělením formy. V případě ventilátoru došlo k mírnému „zkroucení“ talíře, jelikož při skládání dílů nebylo možné dodržet optimální přesnost dělicí plochy.

U gravitačního lití odlitku ventilátoru je největší starostí technologů zajistit dokonalé doběhnutí lopatek a žeber. U 3D tisku písku lze přesně vytisknout prostor pro tzv. přelitky, což je výhodou této technologie. Vytisknutý prostor po obvodu lopatek a žeber umožní tekutému kovu lopatku lépe zaplnit. Kov zatéká až do předtisknutého prostoru přelitku, tím se vytvoří tenká „kovová blána“, která se po odlití jednoduše obrousí. Přelitek, který vznikl zaplněním prostoru přesahu definovaném na formě lze vidět na Obr. 32. Další technické zhodnocení odlitku je uvedeno v Tab.



Obr. 32 Detail lopatky ventilátoru

Tab. 15 Technické zhodnocení odlitku

| TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ VENTILÁTORU | | |
|----------------------------------|---|--------------------------------------|
| Věc k hodnocení | Popis vady | Popis eliminace vady |
| Celková kvalita povrchu | V pořádku | |
| Rozměry odlitku | Nedostatečná rovinnost po obvodu talíře | Navaření ploch, Obrábění u zákazníka |
| Povrchové vady | Mírné zadrobeniny v oblasti příruby | Zavařením |
| Zaběhnutí lopatek a žeber | V pořádku | |

• Přímé náklady na výrobu odlitku ventilátoru technologií 3D Sand Printing

Celkové přímé náklady na výrobu ventilátoru metodou 3D Sand Printing se skládaly z následujících dílčích nákladů: náklady na zpracování 3D dat pro tisk forem, náklady na tisk formy, náklady na dopravu formy, náklady na přípravu formy k lití a náklady za materiál a energie. Jednotlivé náklady jsou uvedeny v Tab. 15.

Tab. 16 Náklady na výrobu ventilátoru

| NÁKLADY NA VÝROBU VENTILÁTORU | |
|----------------------------------|--------------------|
| Zpracování 3D dat pro tisk forem | 10 800,- Kč |
| Tisk formy | 27 500,- Kč |
| Doprava formy | 5 000,- Kč |
| Příprava formy | 2 300,- Kč |
| Materiál a energie | 850,- Kč |
| Náklady celkem | 46 450,- Kč |

Pozn. jednotlivé náklady jsou vyjádřeny v cenách bez DPH.

- **Doba na zhotovení výroby odlitku technologií 3D Sand Printing**

Čas na zhotovení odlitku od obdržení objednávky činil **17 dní**.

4 dny byly nutné ke konzultaci technologie a následné formě 3D dat pro tisk forem. Data byla posléze odeslána k tisku. Forma byla vytištěna do 7 dnů od přijetí 3D dat modelárnou. Jeden den po ukončení tisku byla forma doručena do slévárny. Další den byl odlitek odlit. Následující den po odlití probíhaly dokončovací operace ventilátoru, které zabraly 3 dny. Časový harmonogram uplynulých operací je uveden v Tab. 15.

Tab. 17 Doba potřebná ke zhotovení odlitku ventilátoru technologií 3D Sand Printing

| DOBA ZHOTOVENÍ ODLITKU | |
|------------------------|---------------|
| Tvorba 3D dat formy | 4 dny |
| Tisk formy | 7 dní |
| Doprava formy | 1 den |
| Příprava formy | 1 den |
| Odlití ventilátoru | 1 den |
| Dokončovací operace | 3 dny |
| Celková doba | 17 dní |

Dohodnutá cena za odlitek mezi slévárnou a zákazníkem činí **56 000,- Kč**. Celkové přímé náklady na vyhotovení tohoto odlitku činily **46 450,- Kč**. Celkový rozdíl mezi přímými náklady na výrobu a sjednanou cenou za výrobek byl **9 550,- Kč**. V kapitole 3.2 je naznačena zvýšená míra rizika, která slévárna uzavřením smlouvy o dodání odlitku musí podstoupit.

Nejpravděpodobnější možná rizika u technologie 3D Sand Printing jsou následující: riziko poškození formy při přepravě, riziko poškození formy při skládání, riziko zadržení odlitku formovací směsí, nedodržení rovinnosti talíře a dalších rozměrových nepřesností, špatná volba slévárenské technologie, slévárenské vady apod.

V tomto případě byl odlitek zákazníkem akceptován i s drobnými nedostatky viz Tab. 15. Za předpokladu, že by odlitek nebyl zákazníkem akceptován, by slévárna v rámci dohodnutých podmínek musela vyrobit nový odlitek bez nároků na zvýšení sjednané ceny. V případě, že by nebylo nutné měnit konstrukci formy by slévárna musela znovu vynaložit náklady viz Tab. 18. V případě, že by bylo nutné měnit konstrukci formy, by slévárna byla znovu zatížena náklady viz Tab. 16.

Tab. 18 Náklady nutné pro výrobu nového ventilátoru metodou 3D Sand Printing

| NÁKLADY NA OPĚTOVNOU VÝROBU VENTILÁTORU | |
|---|--------------------|
| Tisk formy | 27 500,- Kč |
| Doprava formy | 5 000,- Kč |
| Příprava formy | 2 300,- Kč |
| Materiál a energie | 850,- Kč |
| Náklady celkem | 35 650,- Kč |

Pozn. jednotlivé náklady jsou vyjádřeny v cenách bez DPH.

Náklady na opětovnou výrobu ventilátoru by činili nejméně **35 650,- Kč**. Při přičtení nákladů **46 450,- Kč** za první odlitek, by byly celkové náklady ve výši **82 100,- Kč**. Celkový rozdíl přímých nákladů a sjednané ceny za odlitek ventilátoru, který byl odlit na druhý pokus, by v tomto případě činil **-26 100,- Kč**. A časová ztráta by byla pravděpodobně **13 dní**.

Vzhledem k tomu, že odlitek ventilátoru je relativně jednoduchý na výrobu volného modelu, byly posouzeny možnosti alternativní výroby pro případ neúspěchu výroby metodou 3D Sand Printing.

- **Přímé náklady na výrobu odlitku použitím vytištěného volného modelu**

Přímé náklady na výrobu ventilátoru použitím vytištěného volného modelu by se skládaly z následujících dílčích nákladů: výroba volného modelu včetně dopravy, náklady na přípravu formy k lití a náklady za materiál a energie. Jednotlivé náklady jsou uvedeny v Tab. 19.

Tab. 19 Náklady na výrobu ventilátoru použitím volného modelu

| NÁKLADY NA VÝROBU VENTILÁTORU POMOCÍ VOLNÉHO MODELU | |
|--|--------------------|
| Výroba volného modelu vč. dopravy | 38 500,- Kč |
| Příprava formy | 2 300,- Kč |
| Materiál a energie | 850,- Kč |
| Náklady celkem | 41 650,- Kč |

Pozn. jednotlivé náklady jsou vyjádřeny v cenách bez DPH.

- **Doba na zhotovení výroby odlitku technologií použitím vytištěného volného modelu**

Předpokládaný čas na zhotovení odlitku od obdržení objednávky by činil **19 dní**. 14 dní od zaslání potřebných informací slévárnou by trvalo modelárně vyrobit volný model včetně doručení modelu do slévárny. Jeden den by trvala příprava formy k lití. Další den by byl ventilátor odlit. Následující den po odlití, by probíhaly dokončovací operace ventilátoru, které by zabraly až 3 dny. Pravděpodobný časový harmonogram zhotovení odlitku použitím volného modelu je uveden v Tab. 20.

Tab. 20 Doba potřebná ke zhotovení odlitku ventilátoru technologií 3D Sand Printing

| DOBA NA ZHOTOVENÍ ODLITKU POMOCÍ VOLNÉHO MODELU | |
|--|---------------|
| Výroba modelu vč. dodání | 14 dny |
| Příprava formy | 1 den |
| Odlití ventilátoru | 1 den |
| Dokončovací operace | 3 dny |
| Celková doba | 19 dní |

Dohodnutá cena za odlitek by zůstala na stejné hodnotě **56 000,- Kč**. Přičemž celkové náklady nutné ke zhotovení ventilátoru zaformováním volného modelu by činily **41 650,- Kč**. Celkový rozdíl mezi přímými náklady na výrobu a sjednanou cenou za výrobek byl **14 350,- Kč**.

Pokud by se objevila na odlitku neopravitelná vada, musel by být odlitek odlit znovu. Na rozdíl od technologie 3D Sand Printing je u volného modelu výhodou, že se nemusí znovu vyrábět jako tištěná forma. Výdaje slévárny k opětovnému vyhotovení odlitku se pak skládají pouze z nákladů na přípravu formy a nákladů za materiál a energie, viz Tab. 21.

Tab. 21 Náklady nutné pro výrobu nového ventilátoru použitím volného modelu

| NÁKLADY NA OPĚTOVNOU VÝROBU VENTILÁTORU | |
|---|------------|
| Příprava formy | 2 300,- Kč |
| Materiál a energie | 850,- Kč |
| Náklady celkem | 3 150,- Kč |

Pozn. jednotlivé náklady jsou vyjádřeny v cenách bez DPH

Náklady na opětovnou výrobu ventilátoru činí **3 150,- Kč** při přičtení nákladů **41 650,- Kč** za první odlitek jsou celkové náklady ve výši **44 800,- Kč**. Rozdíl sjednané ceny za odlitek a nákladů za odlitek ventilátoru, který byl odlit na druhý pokus, by v tomto případě činil **11 200,- Kč**. A časová ztráta by byla pravděpodobně **4 dny**.

• Závěr

Rozdíl sjednané ceny za odlitek a nákladů za odlitek za bezchybné odlití ventilátoru do vytištěné formy technologií 3D Sand Printing činil **9 550,- Kč**. Tento odlitek byl odlit v časovém intervalu **17 dní**. Za bezchybné odlití při případném zhotovení formy pomocí volného modelu by rozdíl sjednané ceny za odlitek a nákladů za odlitek činil **14 350,- Kč**, přičemž by odlitek byl zřejmě odlit v časovém intervalu **19 dní**.

Při jedné chybě u technologie 3D Sand Printing by zisk za odlitek vykazoval zápornou částku **-26 100,- Kč** a časovou ztrátu **13 dní**. Nutný čas na výrobu odlitku na druhý pokus by byl 30 dní. Při jedné chybě u ventilátoru odlitého do formy zhotovené použitím volného modelu by byl zisk v kladných hodnotách ve výši **11 200,- Kč**, přičemž časová ztráta by byla pravděpodobně **4 dny**. Nutný čas na výrobu odlitku na druhý pokus by v tomto případě byl 23 dní. Výhody a nevýhody jednotlivých metod týkajících se odlitku ventilátoru jsou uvedeny v Tab. 22.

Tab. 22 Výhody a nevýhody obou technologií při výrobě odlitku ventilátoru

| ZHODNOCENÍ PRO VÝROBU VENTILÁTORU | |
|-----------------------------------|---|
| 3D Sand Printing | Volný model |
| Výhody | Výhody |
| + Netradiční technologická řešení | + odformování celého dílu naráz |
| + Rychlejší výroba formy | + garantovaná rovinnost ventilátoru |
| Nevýhody | + nižší míra rizika |
| - rozměrové defekty | Nevýhody |
| - přesné definování dělicí roviny | - možné problémy s odformováním hlubokých lopatek |
| - vyšší míra rizik | |

Výše uvedená porovnání jsou platná pouze pro výrobek ventilátoru. V případě složitějších odlitků se může hodnocení zásadním způsobem měnit ve prospěch metody 3D Sand Printing. V případě, že výroba odlitku by vyžadovala složité modelové zařízení, byly by zvýšeny náklady a čas potřebný k výrobě tohoto zařízení. U typově jiných odlitků, kde by nebylo nutné formu dělit na velký počet dílů, by se neprojevily rozměrové defekty tak jako u ventilátoru.

4 ZÁVĚRY

V bakalářské práci byl vytvořen přehled aditivních technologií (dále AT) podle americké společnosti pro zkoušení a materiály ASTM. ASTM rozdělila AT na sedm částí podle typu používaného materiálu, způsobu nanášení techniky a způsobu, jakým je materiál taven nebo jakým způsobem materiál tuhne. V práci byly také tyto technologie rozděleny podle typu skupenství základního materiálu. Uvedené druhy aditivních metod jsou v jednotlivých kapitolách bakalářské práce podrobněji popsány u konkrétních příkladů využití v oblasti slévárenství.

Bakalářská práce také popisuje tři možnosti výroby prototypových odlitků. Jednou z uvedených možností je technologie na vypařitelný model „Full Mold“, která spočívá v zaformování polystyrenového modelu, který je následně vypařen tekutým kovem. Tato metoda je vhodná pro výrobu tvarově složitých odlitků v široké hmotnostní škále. V návaznosti na tuto technologii je v práci okrajově zmíněna technologie vypařitelného modelu „Lost Foam“, kdy je polystyrenový model zaformován do nevytvrzeného ostřiva. Technologie umožňuje výrobu odlitků ve velkých sériích, ale je nutné mít k dispozici předpěňovací zařízení a kovové formy ke zhotovení modelů.

V práci jsou také zmíněny a podrobněji popsány čtyři cesty zhotovování prototypových odlitků na vytavitelný model při využití aditivních technologií. Jedná se o přímou výrobu skořepiny, kde je využíváno metod DLSC (Direct Laser Sintering of Ceramics) a DSPC (Direct Shell Production Casting), dále o nepřímou výrobu skořepiny využívající technologii FDM (Fused Deposition Modeling) a Solidscape. Třetí cestou je výroba matečné formy pro tvorbu voskových modelů metodou Soft Tooling. Jako poslední možností, jak zhotovit odlitek využitím aditivních technologií, je výroba trvalých kovových forem technologiemi DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a LENS (Laser Engineered Net Shaping).

Vzhledem ke spolupráci s firmou Armatmetal s.r.o. a Focam s.r.o. a s ohledem na jejich projekty týkajících se 3D tisku písku je v bakalářské práci uveden základní princip technologie a reálný příklad odlitku ventilátoru odlitého do vytištěné formy.

3D tisk písku popisuje aditivní metoda Binder-Jetting (BJ) a v práci je podrobněji rozebrána. Bakalářská práce se také věnuje výrobcům tiskáren, zprostředkovatelské společnosti zabývající se 3D tiskem písku v České Republice a také některým firmám vlastnící tato tisková zařízení a působící v České Republice. Dále je v práci zmíněn seznam zařízení a přísady nutné k vytištění směsi. V části „Příloha 1“ jsou pak uvedeny podrobnější informace o zařízeních a přísadách.

Podstatnou částí práce je také závěrečná kapitola týkající se realizace odlitku ventilátoru ve společnosti Armatmetal s.r.o. V bakalářské práci je popsána výroba odlitku od přijmutí objednávky až po odlití ventilátoru. Nejdříve jsou zmíněny kroky nutné k realizaci odlitku (návrh formy, zajištění tisku, technologie lití apod.). Zmíněna jsou také rizika, která jsou v spojení s litím do tištěné formy. Vzhledem k tomu, že technologie tisku vyžaduje rozdělit formu na mnoho částí je v práci uvedena i příprava, skládání a způsob zatížení formy.

V této kapitole jsou také zahrnuty časové, technické a nákladové parametry výroby odlitku ventilátoru vyrobeného pomocí vytištěné formy. Pro porovnání je uvedena alternativní výroba prototypového odlitku ventilátoru pomocí vytištěného volného modelu pro klasické formování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHUA, Chee a Kah LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd, 2016. ISBN 9789814571418.
2. Voxeljet builds Aston Martin models for James Bond film Skyfall. *3ders.org*. [Online] 2012. <http://www.3ders.org/articles/20121107-voxeljet-builds-aston-martin-models-for-james-bond-film-skyfall.html>.
3. Nike patents 3D printed shoe technology, getting ready to print 3D shoes. *3ders.org*. [Online] 2015. <http://www.3ders.org/articles/20151014-nike-patents-3d-printed-shoe-technology.html>
4. Plastic parts of the Aston Martins ©Propshop Modelmakers Ltd. *3Ders*. [Online] 2012. http://www.3ders.org/images/1.Plastic_part_Aston_Martin.jpg
5. Finished model of the Aston Martins ©Propshop Modelmakers Ltd. *3Ders*. [Online] 2012. http://www.3ders.org/images/3.Model_.jpg
6. Printed 3D shoe. *3Ders*. [Online] 2015. <http://www.3ders.org/images2015/could-3d-printing-future-shoe-manufacturing-nike-coo-thinks-so-1.jpg>.
7. DRDA, Jan. *Přehled pokročilých technik rapid prototyping a jejich využití ve slévárenství*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v brně: Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Martin Macků.
8. The Basics: How does 3D printing work?. *3dhubs.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing#basics>
9. Gears set with moving parts. *3dhubs.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/sites/all/themes/hubs3d/images/landingpage/3d-101/technologies/sla/planetary-gears.jpg>
10. Our Story. *3dsystems.com* [online]. 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
11. Printing a human kidney. *YouTube* [online]. 2011 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=9RMx31GnNXY>
12. First 3D printer. In: *3dhubs.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/sites/all/themes/hubs3d/images/landingpage/3d-101/basics/first-3d-printer.jpg>
13. The first-ever 3D printed part. In: *3dsystems.com* [online]. 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: https://www.3dsystems.com/sites/default/files/styles/max_1300x1300/public/2017-01/1983_0.jpg?itok=3g_pgvx8

14. Additive Manufacturing Processes Classification. *Omnexus.specialchem.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://omnexus.specialchem.com/selection-guide/3d-printing-and-additive-manufacturing-polymers-and-processes/additive-manufacturing-processes-classification#content>
15. ASTM. *Revel: Slovník pojmů* [online]. b.r. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.revel-pex.com/slovník-pojmu/A/astm.html>
16. Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. *Astm.org* [online]. b.r. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>
17. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). *Konstrukter.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
18. HORÁČEK, Milan, Radim ČAGÁNEK a Vojtěch VAŠEK. Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2016, **64**(7-8), 218-225. ISSN 0037-6825.
19. 3DSystems Logo. In: *3dsystems.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/themes/ddd/images/logo-3ds-dark.svg>
20. B9 Creations. In: *B9c.com* [online]. 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.b9c.com/assets/images/uploads/b9creations-logo-2017.png>
21. CMET Logo. In: *Cmet.co.jp* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.cmet.co.jp/imgen/common/logo.png>
22. DWS Logo. In: *Dwssystems.com* [online]. 2015 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.dwssystems.com/wp-content/uploads/2015/10/DWS_logo.png
23. Formlabs Logo. In: *Formlabs.com* [online]. 2014 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: https://formlabs.com/media/upload/Formlabs_Logo_2014-grey_preferred_1.png
24. Stratasys Logo. In: *Stratasys.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/-/media/Features/Navigation/logo.svg?la=en&hash=9F1D6065535E8BFADFBFE7005FFE9B889C151E75>
25. Cubic Technologies Logo. In: *Cubicttechnologies.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.cubicttechnologies.com/banner.gif>
26. Kira Corporation Logo. In: *Kiracorp.co.jp* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.kiracorp.co.jp/site-en/img/common/logo.gif>
27. Mcor technologies Logo. In: *Mcortechologies.com* [online]. 2015 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://mcortechologies.com/wp-content/uploads/2015/11/mcor-logo3.png>
28. Arcam Logo. In: *Arvam.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/wp-content/themes/arcam/images/logo.svg>

29. ExOne Logo. In: *Exone.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.exone.com/Portals/0/exone_logo.png
30. Optomec Logo. In: *Optomec.com* [online]. 2015 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2015/11/OPTOMECE_300.png
31. VoxelJet Logo. In: *Voxeljet.com* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.voxeljet.com/typo3conf/ext/site_assets/Resources/Public/Images/logo.png
32. JURČKA, Ivo a Otto NOVOTNÝ. Specifika technologie výroby odlitků litých na spalitelný model. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2005, **53**(4), 169-173. ISSN 0037-6825.
33. HOLOUBEK, Zdeněk. Zkušenosti s výrobou vypěňovacích forem pro slévárenskou technologii lost foam ve Vsetínské modelárně, s.r.o.: Experience with manufacture of moulds for lost foam patterns in the pattern shop of Vsetínská modelárna, Ltd. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2008, **56**(1-2), 31-33. ISSN 0037-6825.
34. SLOVÁK, Vojtěch. *Zavedení výroby odlitku na spalitelný model v podmínkách ZPS Slévárna, a. s* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/34431>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Horáček.
35. MORES, Antonín, Jaroslav PROVAZNÍK, Karel SKLENÁŘ a Pavel SÝKORA. *TECHNICKÁ ZPRÁVA: Předpis pro výrobu odlitků z LKG a LLG na spalitelný polystyrénový model*. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2006.
36. Výroba pěnového polystyrenu EPS. *Sepas* [online]. Žasová: Sepas a.s., 2009 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: http://www.sepas.cz/produkty/vyroba/vyroba_b.html
37. Expanded polystyrene pre-expander. *Direct Industry* [online]. Marseille: VirtualExpo SAS, 2017 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: http://www.directindustry.com/prod/shanghai-zhongji-machinery-coltd/product-119761-1436079.html#product-item_1430297
38. HOLOUBEK, Zdeněk. Zkušenosti s výrobou vypěňovacích forem pro slévárenskou technologii lost foam ve Vsetínské modelárně, s.r.o.: Experience with manufacture of moulds for lost foam patterns in the pattern shop of Vsetínská modelárna, Ltd. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2008, **56**(1-2), 31-33. ISSN 0037-6825.
39. Lost Foam. *Wieland* [online]. Ulm: Wieland, 2016 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.wieland-karriere.de/mediaPool/content/media/aktuelles/pressebilder/lost_foam_giessanlage/150123BannerLostFoam2015GSW-Ru.jpg

40. HORÁČEK, Libor. Unikátní technologie 3D tisku písku. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-technologie-3d-tisku-pisku.html>
41. ŠLAJS, Jan. Nové trendy v technologii výroby slévárenských forem. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-trendy-v-technologie-vyroby-slevarenskych-forem.html>
42. S-Max Digital Core Production System. In: *YouTube* [online]. ExOne: Digital Part Materialization, 2012 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=UtlQBXC2vsk>
43. History of ExOne. *Exone.com* [online]. b.r. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.exone.com/About-ExOne/History>
44. Informace o nás. *3dtiskarna.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarna.cz/o-nas/>
45. O nás. *Metos.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.metos.cz/onas.html>
46. O společnosti. *Modelarna-liaz.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.modelarna-liaz.cz/o-spolecnosti/>
47. THE VOXELJET COMPANY HISTORY. *Voxeljet.com* [online]. b.r. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.com/company/company-history/>
48. Production Printers. *Exone.com* [online]. b.r. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Systems>
49. Printing systems from Voxeljet. *Voxeljet.com* [online]. b.r. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.com/3d-printing-systems/>
50. GS 14: GIESSEREISANDE. *Strobel-quarzsand.de* [online]. b.r. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.strobel-quarzsand.de/media/GS14RP.pdf>
51. Literature & Resources. *Exone.com* [online]. b.r. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Resources/Literature>
52. SAND CASTING MOLDS - RAPID AND ECONOMICAL. *Voxeljet.com* [online]. b.r. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.com/materials/sand/>
53. Slévárenské písky. *Sandteam.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.sandteam.cz/slevarenske-pisky/>
54. Technický list: Kerphalite. *Sandteam.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.sandteam.cz/new/wp-content/uploads/2015/05/Kerphalite.pdf>
55. *S-Max Furan - Digital Core Production: Catalogue 2014 Revision 4*. Gersthofen, 2014
56. S-Max® Furan. *Exone.com* [online]. 2015 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.exone.com/Portals/0/Systems/S-Max/X1_SMaxFuran_US.pdf

57. HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno: VUT FSI, 2003, 89 s. Příloha teze.
58. VAŠEK, Vojtěch. *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Milan Horáček.
59. ČAGÁNEK, Radim. *Možnosti uplatnění moderních aditivních technologií při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Milan Horáček.
60. Alucast: Proč odlitek. *Alucast.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://alucast.cz/cs/proc-odlitek>
61. SPO spol. s r. o. : O nás. *SPO-zlin.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.spo-zlin.cz/cs/o-nas/>
62. University of Northern Iowa: Rapid Tooling in Metal Casting. *Uni.edu* [online]. 2015 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.uni.edu/~rao/rt/flowchart3.htm>
63. Solidscape 3D Printing Process. *YouTube* [online]. SolidscapeInc, 2011 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=gM86qxW7vP8>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení | Legenda | Jednotka |
|----------|---|----------|
| 3D | Three Dimensional | [-] |
| 3SP | Scan, Spin, and Selectively Photocure | [-] |
| A | Tažnost | [%] |
| ABS | Acrylonitrile Butadiene Styrene | [-] |
| ASTM | American Society for Testing and Materials | [-] |
| AT | Aditivní Technologie | [-] |
| BJ | Binder Jetting | [-] |
| BMW | Bayerische Motoren Werke | [-] |
| CAD | Computer Aided Design | [-] |
| CAM | Computer Aided Manufacturing | [-] |
| CDLP | Continuous Digital Light Processing | [-] |
| CNC | Computer Numerical Control | [-] |
| DLP | Digital Light Processing | [-] |
| DMD | Direct Metal Deposition | [-] |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering | [-] |
| DOD | Drop On Demand | [-] |
| DSPC | Direct Shell Production Casting | [-] |
| EBF3 | Electron Beam Free-Form Fabrication | [-] |
| EBM | Electron Beam Melting | [-] |
| EPS | Expanded Polystyrene Styrofoam | [-] |
| FDM | Fused Deposition Modelling | [-] |
| FFF | Fused Filament Fabrication | [-] |
| LAN | Local Area Network | [-] |
| LENS | Laser Engineered Net Shaping | [-] |
| LMD | Laser Metal Deposition | [-] |
| LOM | Laminated Object Manufacturing | [-] |
| MJP | MultiJet Printing | [-] |
| MJF | Multi-Jet Fusion | [-] |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration | [-] |
| NPJ | NanoParticle Jetting | [-] |
| PLT | Paper Lamination Technology | [-] |
| PMMA | Polymethylmethacrylate | [-] |
| Rm | Mez pevnosti | [MPa] |
| Rp0,2 | Smluvní mez kluzu | [MPa] |

| | | |
|------|--|-----|
| SDL | Selective Deposition Lamination | [-] |
| SLA | Stereolithography Apparatus | [-] |
| SLM | Selective Laser-Melting | [-] |
| SLS | Selective Laser Sintering | [-] |
| SOUP | Solid Object Ultraviolet-laser Printer | [-] |
| STL | Stereolithography | [-] |
| TIG | Tungsten Inert Gas Welding | [-] |
| UV | Ultra Violet | [-] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Plastový Aston Martin DB5[4] | 9 |
| Obr. 2 Model Aston Martin DB5 [5] | 9 |
| Obr. 3 Vytištěná sportovní obuv [6] | 9 |
| Obr. 4 CAD model hřídele vytvořený v softwaru AutoDesk Inventor..... | 10 |
| Obr. 5 Převezená hřídel do STL formátu v softwaru AutoDesk Inventor..... | 10 |
| Obr. 6 Vytištěné soukolí [9] | 10 |
| Obr. 7 První 3D tiskárna vynalezená Chuckem Hullem v roce 1983 [12] | 11 |
| Obr. 8 První vytištěná součást Chuckem Hullem v roce 1983 [13]. | 11 |
| Obr. 9 Rozdělení AT dle skupenství základního materiálu [8], [14]..... | 13 |
| Obr. 10 Ukázka prototypového odlitku chladiče..... | 17 |
| Obr. 11 Postup výroby odlitku metodou vypařitelného modelu [34]..... | 17 |
| Obr. 12 Postup technologie vypařitelného modelu | 18 |
| Obr. 13 Předpěňovací zařízení [37] | 18 |
| Obr. 14 Únik plynů při lití [34] | 29 |
| Obr. 15 Postup výroby „Lost Foam“ [39]..... | 20 |
| Obr. 16 Princip technologie „Sand Printing“ [41]..... | 21 |
| Obr. 17 Postup tisku na zařízení S-Max® [42] | 22 |
| Obr. 18 Zařízení S-Max® [56]..... | 26 |
| Obr. 19 Rozmístění tiskárny a přídavných zařízení [41], [55]..... | 26 |
| Obr. 20 Původní princip odlévání bronzového modelu na ztracený včelí vosk [57] | 28 |
| Obr. 21 Technologie vytavitelného modelu [60], [61] | 39 |
| Obr. 22 Postup technologie vytavitelného modelu [57] | 30 |
| Obr. 23 Možnosti využití aditivních technologií pro přesné lití na vytavitelný model [62]..... | 31 |
| Obr. 24 Časové porovnání metod přesného lití [18], [59] | 33 |
| Obr. 25 Vytištěná forma..... | 35 |
| Obr. 26 Jednotlivé části formy | 35 |
| Obr. 27 Forma těsně před zatížením formovací směsí | 36 |
| Obr. 28 Forma připravená k lití..... | 36 |
| Obr. 29 Odlévání ventilátoru..... | 36 |
| Obr. 30 Surový odlitek ventilátoru | 36 |
| Obr. 31 Průběh zhotovení odlitku ventilátoru do tištěné formy..... | 37 |
| Obr. 32 Detail lopatky ventilátoru..... | 38 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Rozdělení aditivních technologií dle ASTM F42 [14], [17] | 12 |
| Tab. 2 Technologie založené na tekutém základě [8], [20], [21], [22], [23], [24], [25] | 14 |
| Tab. 3 Technologie založené na pevném základě. [1], [8], [24], [25], [26], [27] | 15 |
| Tab. 4 Technologie založené na práškovém základě [1], [18], [19], [28], [29], [30], [31] | 16 |
| Tab. 5 Výhody a nevýhody lití na vypařitelný model | 21 |
| Tab. 6 Seznam zařízení pro přímý tisk pískových forem a jader | 24 |
| Tab. 7 Porovnání cen formovacích směsí | 24 |
| Tab. 8 Chemické složení ostřiv [50], [53], [54] | 25 |
| Tab. 9 Roztřídění formovacích směsí II. Generace | 25 |
| Tab. 10 Parametry zařízení S-Max® [56] | 26 |
| Tab. 11 Popis zařízení a rozložení tiskárny ExOne S-Max® [41], [55] | 27 |
| Tab. 12 Vlastnosti vytištěné formy nebo jádra zařízením ExOne S-Max® [55] | 27 |
| Tab. 13 Základní informace o ventilátoru | 34 |
| Tab. 14 Chemické složení AlSi9Cu3(Fe) | 34 |
| Tab. 15 Technické zhodnocení odlitku | 38 |
| Tab. 16 Náklady na výrobu ventilátoru | 38 |
| Tab. 17 Doba potřebná ke zhotovení odlitku ventilátoru technologií 3D Sand Printing | 39 |
| Tab. 18 Náklady nutné pro výrobu nového ventilátoru metodou 3D Sand Printing | 39 |
| Tab. 19 Náklady na výrobu ventilátoru použitím volného modelu | 40 |
| Tab. 20 Doba potřebná ke zhotovení odlitku ventilátoru technologií 3D Sand Printing | 40 |
| Tab. 21 Náklady nutné pro výrobu nového ventilátoru použitím volného modelu | 41 |
| Tab. 22 Výhody a nevýhody obou technologií při výrobě odlitku ventilátoru | 41 |

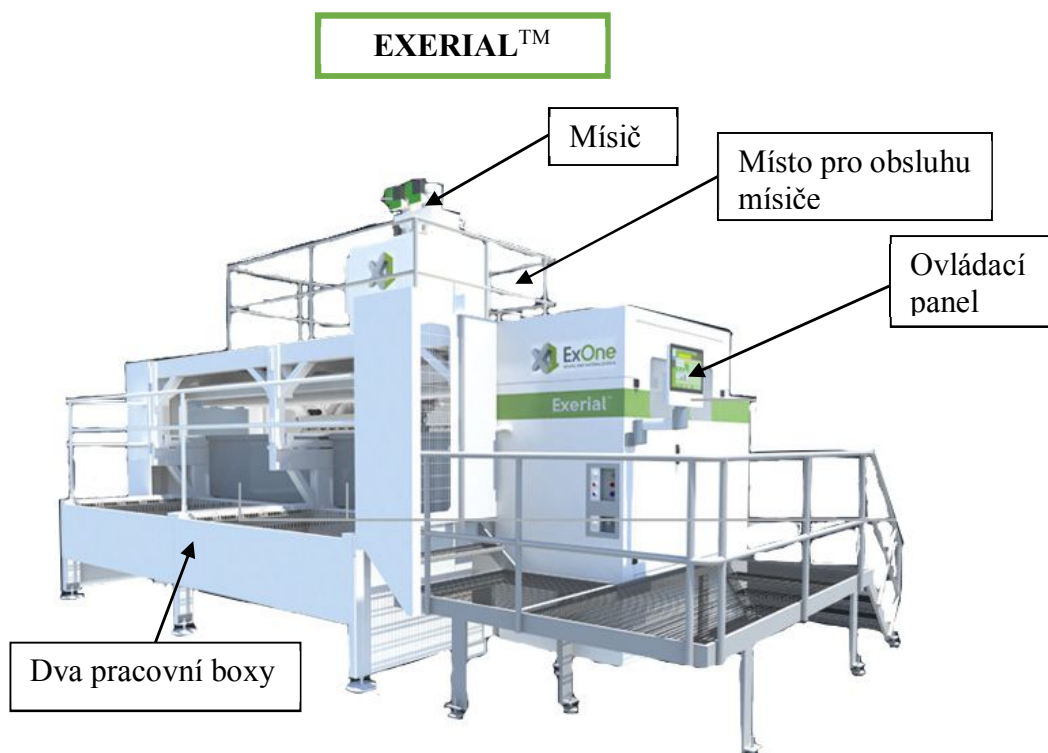
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Zařízení a další informace o „3D Sand Printing“

ZAŘÍZENÍ ExOne

A) Exerial™

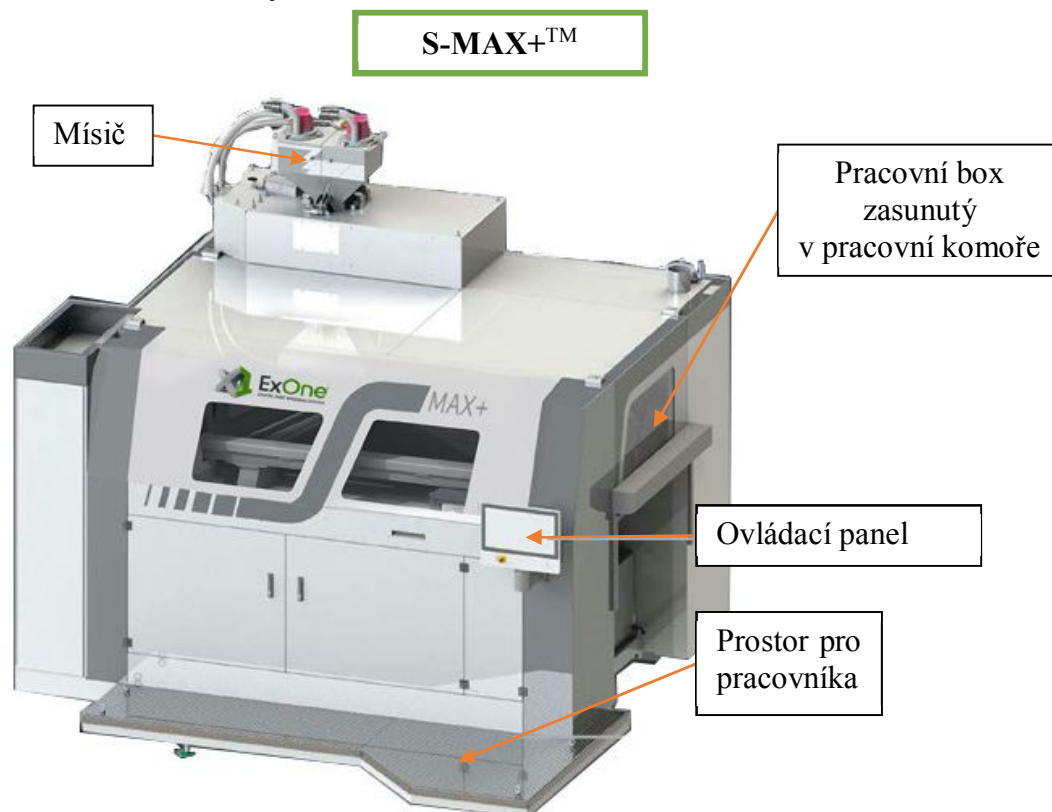
Tiskárna obsahuje dva pracovní boxy o objemu tisku až 3,696 litru. Tiskárny nové řady „Multiple Exerial™“ jsou schopny pracovat ve výrobním systému napojeném na internetovou síť. Tato vysoce automatizovaná tiskárna je ideální pro hromadnou výrobu.



| TECHNICKÉ PARAMETRY | | |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Furan | Vodní sklo |
| Využitelný objem tisku | 2200 x 1200 x 700 mm x 2 | |
| Rychlost tisku | 300–400 L.h ⁻¹ | 300–320 L.h ⁻¹ |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 280–500 µm | 280–380 µm |
| Rozlišení tisku | 100 µm | |
| Vnější rozměry tiskárny | 8380 x 4030 x 4950 mm | |
| Váha tiskárny | 11200 kg | |

B) S-MAX+™

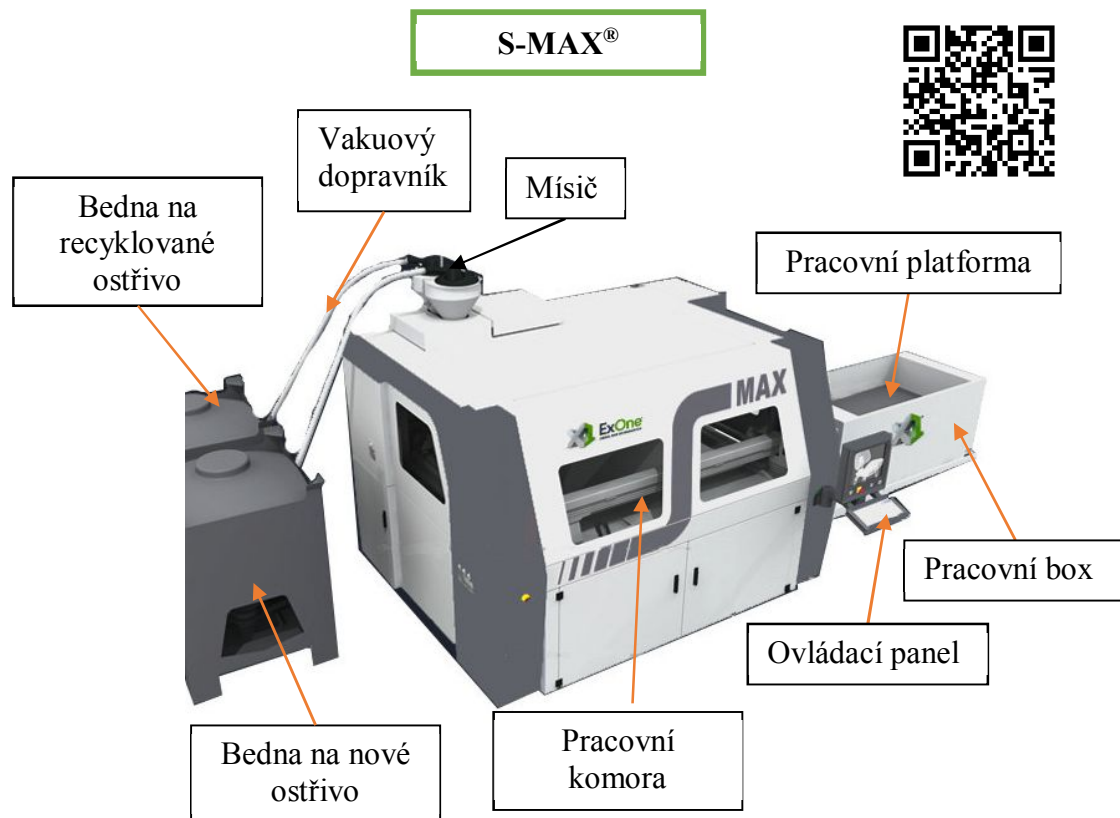
Tiskárna S-MAX+™ je schopna tisknout velmi složité pískové formy a jádra ze směsí na bázi fenolových pryskyřic nebo vodního skla. Tiskárna využívá průmyslové mikrovlnné zařízení vytvrzující pískové formy. Fenolové směsi jsou vhodné pro vysokoteplotní lití a pro náročné a tenkostěnné odlitky.



| TECHNICKÉ PARAMETRY | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Fenol | Vodní sklo |
| Využitelný objem tisku | 1800 x 1000 x 600 mm | |
| Rychlost tisku | 60–85 L.h ⁻¹ | 65-85 L.h ⁻¹ |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 280–500 µm | 280-380 µm |
| Rozlišení tisku | 100 µm | |
| Vnější rozměry tiskárny | 3860 x 3470 x 2890 mm | |
| Váha tiskárny | 5800 kg | |

C) S-MAX[®]

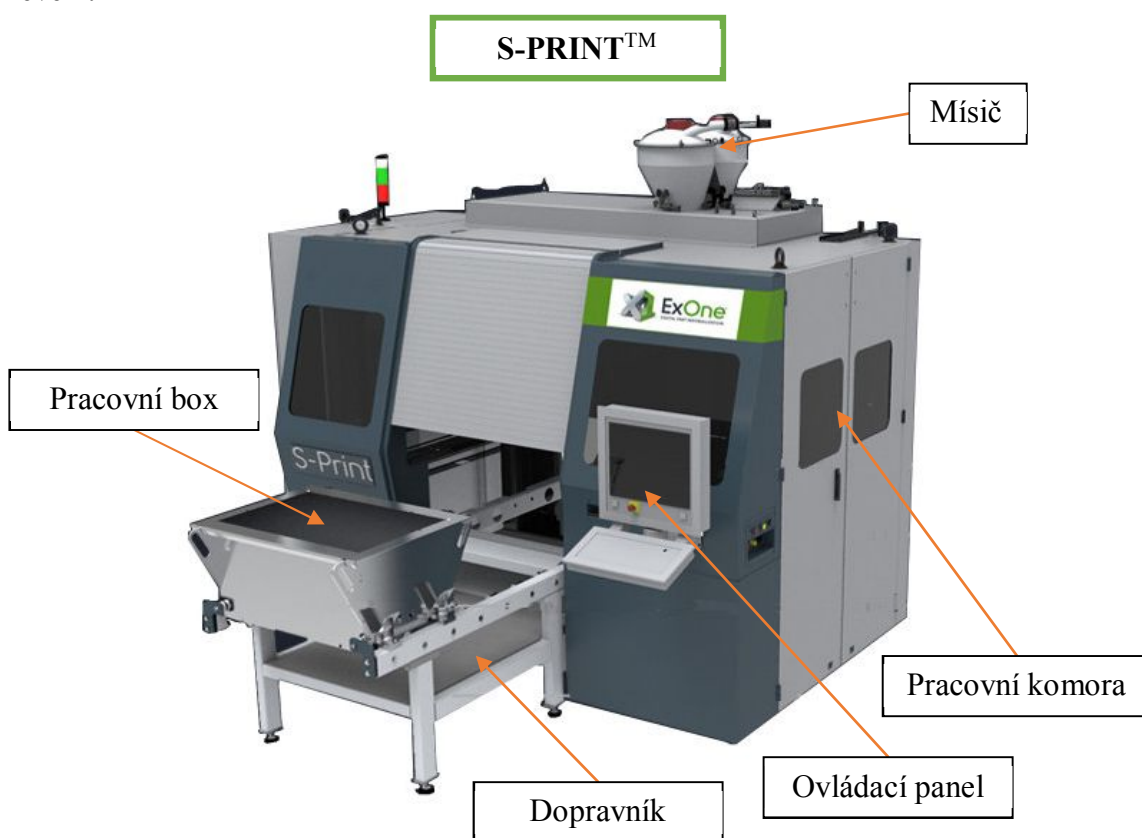
Tiskárna S-MAX[®] je schopna tisknout velmi složité pískové formy a jádra ze směsí na bázi furanových pryskyřic, přímo z CAD dat, čímž eliminuje potřebu modelu a modelových zařízení. Do furanových forem lze odlévat ihned po vytištění. Není třeba formy po vytištění vytvrzovat.



| TECHNICKÉ PARAMETRY | |
|-------------------------|---|
| Furan | |
| Využitelný objem tisku | 1800 x 1000 x 700 mm |
| Rychlost tisku | 60-85 L.h ⁻¹ (Závisí na velikosti zrna) |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 280-500 µm |
| Rozlišení tisku | 100 µm |
| Vnější rozměry tiskárny | 6900 x 3520 x 2860 mm (včetně pracovního boxu vpravo) |
| Váha tiskárny | 5800 kg |

D) S-PRINT™

Tiskárna S-PRINT™ je schopna tisknout velmi složité pískové formy a jádra přímo z CAD dat, čímž eliminuje potřebu modelu a modelových zařízení. Tiskárna je dostupná ve třech provedeních: S-PRINT-Furan, S-PRINT-Phenolic a S-PRINT-Silicate. S-PRINT-Furan tiskne pískové formy a jádra na bázi furanových směsí, S-PRINT-Phenol na bázi fenolových směsí a S-PRINT-Silicate na bázi směsí vytvrzovaných pomocí vodního skla. Přičemž do furanových forem lze odlévat ihned po vytištění a není třeba formy po vytištění vytvrzovat. Formy a jádra na bázi vodního skla a fenolových pryskyřic je nutné před odléváním vytvrzovat mikrovlnným ohřevem.



| TECHNICKÉ PARAMETRY | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Furan | Fenol | Vodní sklo |
| Využitelný objem tisku | 800 x 500 x 400 mm | | |
| Rychlost tisku | 16–36 L.h ⁻¹ | 16–36 L.h ⁻¹ | 16–18 L.h ⁻¹ |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 240–500 μm | 240 μm | 280–340 μm |
| Rozlišení tisku x,y,z | 100 μm | | |
| Vnější rozměry tiskárny | 3270 x 2540 x 2860 mm | | |
| Váha tiskárny | 3500 kg | | |

E) Ostřiva a pojiva do zařízení ExOne

| | | | S-Print® Furan | S-Print® Fenol | S-Print® Vodní sklo | S-Max® Furan | S- Max+ Fenol | S-Max+ Vodní sklo | Exerial® Furan | Exerial® Vodní sklo |
|--------------|---------------------------------|--|-------------------|-------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|
| FS001 | Křemičité ostřivo ExOne® | 280 µm tloušťka vrstvy | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| FS003 | Křemičitý ostřivo ExOne® | 380 µm tloušťka vrstvy | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| FS051 | Kerphalit ExOne® | 400 µm tloušťka vrstvy | | | | ✓ | | | | |
| FS052 | Syntetické ostřivo ExOne® | jádra s nízkou tepelnou roztažností | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| FS053 | Syntetické ostřivo ExOne® | jádra s nízkou tepelnou roztažností | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| FB001 | Pojivo ExOne® | vhodné pro Furan | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| FB101 | Pojivo ExOne® | vhodné pro Fenol | | ✓ | | | ✓ | | | |
| FB901 | Pojivo ExOne® | vhodné pro vodní sklo | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |

F) Aktivátor, čistič a další přísady

| | | | S-Print® Furan | S-Print® Fenol | S-Print® Vodní sklo | S-Max® Furan | S-Max+ Fenol | S-Max+ Vodní sklo | Exerial® Furan | Exerial® Vodní sklo |
|--------------|----------------------------------|--|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------------|------------------------|
| FA001 | Activator ExOne® | vhodné pro Furan a FB001 | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| FA101 | Activator ExOne® | vhodné pro Fenol a FB101 | | ✓ | | | ✓ | | | |
| FA901 | Activator ExOne® | vhodné pro vodní sklo a FB901 | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| FC005 | Čistič ExOne® | rozpouští FB001 | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| FC101 | Čistič ExOne® | rozpouští FB101 | | ✓ | | | ✓ | | | |
| FC901 | Čistič ExOne® | rozpouští FB901 | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| M1001 | Inhibitor Magnesium ExOne® | přidává se do mísice k inhibici reakce | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | |
| AD901 | Přísada ExOne® | zvyšuje pevnost forem | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| AD903 | Přísada ExOne® | snižuje hygroskopické vlastnosti | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |

ZAŘÍZENÍ Voxeljet

A) VX200

Tiskárnu VX200 lze vzhledem k jejich rozměrům bez problému nainstalovat i na méně prostorná pracoviště. Hodí se například i do výzkumných laboratoří. Jedná se o rychlé a snadno ovladatelné zařízení, které umožňuje výrobu malých prototypů a konstrukčních dílů. Lze tisknout plastové částice i slévárenská ostřiva. Tloušťka vrstvy pro plastové materiály činí 150 μm a pro výrobu forem a jader 300 μm .



| TECHNICKÉ PARAMETRY | |
|-------------------------|----------------------|
| Využitelný objem tisku | 300 x 200 x 150 mm |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 300 μm |
| Rozlišení tisku x,y | 300 dpi |
| Vnější rozměry tiskárny | 1700 x 900 x 1500 mm |
| Váha tiskárny | 450 kg |

B) VX1000

Tiskárna VX1000 je rychlé a snadno ovladatelné zařízení, které umožňuje výrobu malých prototypů a konstrukčních dílů. Tiskárna je také vhodná pro tisk malých sérií forem a jader. Lze tisknout plastové částice i slévarenská ostrživa. Tloušťka vrstvy pro plastové materiály činí 150 μm a pro výrobu forem a jader 300 μm .



| TECHNICKÉ PARAMETRY | |
|-------------------------|-----------------------|
| Využitelný objem tisku | 1000 x 600 x 500 mm |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 300 μm |
| Rozlišení tisku x,y | 600 dpi |
| Rychlost tisku | 23 L.h ⁻¹ |
| Vnější rozměry tiskárny | 2800 x 2400 x 2300 mm |
| Váha tiskárny | 3500 kg |

C) VX2000

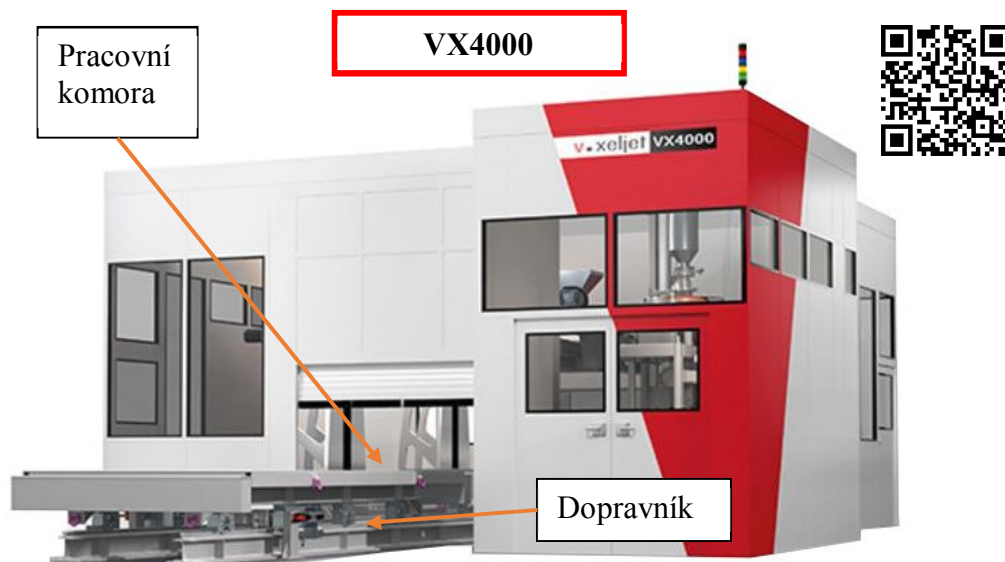
Zařízení VX2000 vhodné pro výrobu velkoformátových forem a jader. Tiskárna je také vhodná pro širokou škálu materiálů dostupných ve Voxeljet. Tiskárnu lze využít pro tisk velkých forem nebo pro velké množství malých dílu zároveň.



| TECHNICKÉ PARAMETRY | |
|-------------------------|-----------------------|
| Využitelný objem tisku | 2000 x 1000 x 1000 mm |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 250-400 μm |
| Rozlišení tisku x,y | 200 dpi/300 dpi |
| Rychlost tisku | 47 L.h ⁻¹ |
| Vnější rozměry tiskárny | 2500 x 4900 x 2300 mm |
| Váha tiskárny | 5000 kg |

D) VX4000

Zařízení VX4000 je velkoformátová tiskárna pro výrobu jakéhokoliv typu předmětu ze základního materiálu v práškové formě. Tiskárna disponuje širokou tiskovou hlavou, která umožňuje rychlou výrobu nadrozměrných objektů.



| TECHNICKÉ PARAMETRY | |
|-------------------------|------------------------|
| Využitelný objem tisku | 4000 x 2000 x 1000 mm |
| Tloušťka tištěné vrstvy | 300 μm |
| Rozlišení tisku x,y | 600 dpi |
| Rychlost tisku | 123 L.h ⁻¹ |
| Vnější rozměry tiskárny | 20000 x 7800 x 1000 mm |

E) Ostřiva a vlastnosti směsí na bázi furanových pryskyřic

| PARAMETRY FURANOVÉ FORMOVACÍ SMĚSI | | | | |
|---|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Ostřivo | Křemičité ostřivo | | | Kerphalit |
| Typ ostřiva | GS 14 | GS 19 | GS 25 | Kerphalit |
| Velikost středního zrna | 140 µm | 190 µm | 250 µm | 200 µm |
| Tloušťka vrstvy | 300 µm | 300/400 µm | 300 µm | 300 µm |
| Pevnost v ohybu | 220-350 MPa | 280-380 MPa | 280-380 Mpa | 220-320 Mpa |
| Propustnost plynů | 65/75 L.h ⁻¹ | 140 L.h ⁻¹ | 250 L.h ⁻¹ | 250 L.h ⁻¹ |

Mailová korespondence s Voxeljet

19. 5. 2017

Brno University of Technology Mail - Sand Printing



Jiří Herzán <152578@vutbr.cz>

Sand Printing

Počet zpráv: 4

Jiří Herzán <152578@vutbr.cz>

8. dubna 2017 11:12

Komu: info@voxeljet.com

To whom it may concern,

I am student of Mechanical Engineering at Brno University of Technology in Czech Republic and I am writing a bachelor thesis with topic "*Possibilities of using additive technologies in direct manufacturing of foundry moulds*". Main part of my thesis is regarding to direct printing of sand molds.

Would you be so kind and write me something more about history of VoxelJet and ExOne? On the website of the ExOne's company is written about splitting company called Generis onto ProMetalRCT (ExOne) and VoxelJet. Then ExOne says that ProMetalRCT (ExOne) is mainly focused on sand casting and Voxeljet is mainly focused on investment casting, but I see all printers in prospects of both companies and I know that Voxeljet are able to print sand mold and cores as well as ExOne. However, in Czech Republic there are only ExOne's printers for sand printing. And companies, in my opinion, using Voxeljet printers mainly for printing PMMA models for investment casting.

Could you tell me please how much you focused on sand printing and is it the article about history on the ExOne's website written correctly? I would be so glad if you help me with my questions.

link to the article about history: <http://www.exone.com/About-ExOne/History>

Best regards,

Jiří Herzán, student of BUT

Tobias King <tobias.king@voxeljet.de>

10. dubna 2017 10:25

Komu: "152578@vutbr.cz" <152578@vutbr.cz>

Good morning Jiri,

thanks for your mail.

X1's history is partly correct.

FYI – we are the owners of the sand printing patent and granted Prometal an exclusive license to sell printers based on this patent.

As mentioned on our website <http://www.voxeljet.com/de/materialien/sand/> we also offer sand printers.

The rest of our relation with X1 is correct.

Best

Tobias King

Von: info info

Gesendet: Montag, 10. April 2017 08:45

An: Tobias King <tobias.king@voxeljet.de>

Betreff: WG: Sand Printing

Mailová korespondence s ExOne

19. 5. 2017

Brno University of Technology Mail - Sand Printing



Jiří Herzán <152578@vutbr.cz>

Sand Printing

Počet zpráv: 2

Jiří Herzán <152578@vutbr.cz>
Komu: europe@exone.com

8. dubna 2017 11:31

To whom it may concern,

I am student of Mechanical Engineering at Brno University of Technology in Czech Republic and I am writing a bachelor thesis with topic "*Possibilities of using additive technologies in direct manufacturing of foundry moulds*". Main part of my thesis is regarding to direct printing of sand molds.

Would you be so kind and write me something more about history of VoxelJet and ExOne? On the website of the ExOne's company is written about splitting company called Generis onto ProMetalRCT (ExOne) and VoxelJet. Then ExOne says that ProMetalRCT (ExOne) is mainly focused on sand casting and Voxeljet is mainly focused on investment casting, but I see all printers in prospects of both companies and I know that Voxeljet are able to print sand mold and cores as well as ExOne. However, in Czech Republic there are only ExOne's printers for sand printing. And companies, in my opinion, using Voxeljet printers mainly for printing PMMA models for investment casting.

Could you tell me please why ExOne is more desired for sand printing? I will be so glad if you help me with my questions.

Best regards,

Jiří Herzán, student at BUT

ExOne Europe <europe@exone.com>
Komu: Jiří Herzán <152578@vutbr.cz>

8. května 2017 15:50

Dear Mr Herzán,

sorry for our late response.

We had some problems with our e-mail account.

It's right that ExOne and Voxeljet have the same history- Generis (<http://www.exone.com/About-ExOne/History>).

For information regarding Voxeljet's service- please contact Voxeljet.

Regarding ExOne, I can send you following information:

ExOne is a global provider of 3D printing machines and 3D printed and other products, materials and services to industrial customers. ExOne's business primarily consists of manufacturing and selling 3D printing machines and printing products to specification for its customers using its installed base of 3D printing machines. ExOne's machines serve direct and indirect applications. Direct printing produces a component; indirect printing makes a tool to produce a component. ExOne offers pre-production collaboration and print products for customers through its network of ExOne Adoption Centers (EACs) and Production Service Centers (PSCs). ExOne also supplies the associated materials, including consumables and replacement parts, and other services, including training and technical support that is necessary for purchasers of its 3D printing machines to print products. The Company believes that its ability to print in a variety of industrial materials, as well as its industry-leading volumetric output (as measured by build box size and printing speed) uniquely position ExOne to serve the needs of industrial customers.

For further information, please don't hesitate to contact me.

